

GLAUBER ACUNHA GONÇALVES

**DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ALTERAÇÕES NA
CARTOGRAFIA CADASTRAL COM BASE EM IMAGENS
DE CÂMARAS DIGITAIS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Ciências Geodésicas

Curitiba
2006

GLAUBER ACUNHA GONÇALVES

**DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ALTERAÇÕES NA
CARTOGRAFIA CADASTRAL COM BASE EM IMAGENS
DE CÂMARAS DIGITAIS**

Orientador:

Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésica
Universidade Federal do Paraná

Curitiba
2006

*Todo o esforço dedico
aos meus pais
e à Valéria
ao Matheus, ao João Victor e à Manoela.
Minhas maiores motivações.*

AGRADECIMENTOS

Expresso toda a minha gratidão, consideração, respeito e reconhecimento de que, sem a participação dessas pessoas e instituições, não haveria logrado êxito no trabalho empreendido. Ora pelo provimento de recursos que me permitiram estar dedicado exclusivamente a esse trabalho por mais de 3 anos. Ora pela disponibilização de dados e suporte no seu tratamento. Ora pelas contribuições técnicas, como dicas de programação, sugestão de modelos, discussão de idéias, possibilidades de abordagem de certos problemas, envio e garimpo de alguns papers ou auxílio no entendimento de outros tantos. Vez por outra pelas correções e orientações nesse escrito. E, finalmente, mas especialmente, pela acolhida, pela companhia, pelo convívio fraterno, pelo apoio moral e compreensão de tantos e tantos que conheci em Curitiba e que me fizeram levar dessa cidade uma coleção de ótimas recordações.

À UFPR – Universidade Federal do Paraná
Ao seu Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Ao seu Departamento de Geomática
À FURG – Fundação Universidade Federal do Rio Grande
Em especial ao Departamento de Física
À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
À Prefeitura do Rio Grande, à Prefeitura de Pelotas e ao Paranaidade

Ao meu orientador Prof^o Edson Aparecido Mitishita
Aos professores das disciplinas que assisti:
Jorge Silva Centeno, Quintino Dal Molin, Camil Gemaël, Sílvio Rogério de Freitas,
Cláudia Krueger, Cláudia Robbi Sluter
e a Márcia Cristina Lopes Quintas (*in memoriam*)
À Verali Mônica Kleuser

À Prof^a Silvia Silva da Costa Botelho e aos professores Ernesto Luiz C. Pinto, Carlos Alberto Garcia e André Damedá
Aos Prof^o Carlos Hartmann e ao Prof^o Gilberto Griep
Ao Vagner da Silva Duarte e ao Paulo Ricardo Salati de Souza

Ao Fernando, ao Everton e ao Rogério
À Ângela e ao Claudionor, ao Sandro e ao Juan
Ao Roosevelt e o Daniel
Ao Marcis, ao Sydney e a Vaneza
E Especialmente ao João Batista
Aos amigos Álvaro Machado
e Pe. Tarcísio Luis

Também ao pessoal da Fabiano de Cristo:
a Roze, a Cris, a Camila, a Nardia, a Teris.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	8
1.2. Estrutura do texto	9
2. AEROFOTOGRAMETRIA DE BAIXO CUSTO	11
2.1. Cartografia cadastral: uma breve descrição do cenário brasileiro	11
2.2. São caros os serviços de aerofotogrametria?	16
2.3. Aerofotogrametria com uso de câmaras digitais de baixo custo	24
2.4. Um sistema aerofotogramétrico de Baixo Custo	34
3. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS E PRINCIPAIS ALGORITMOS	43
3.1. Modelos Matemáticos Fotogramétricos	43
3.1.1. Orientação interior.	45
3.1.2. Orientação exterior	50
3.1.3. Calibração de Câmaras	58

3.2. Síntese, Processamento e Análise de imagens: Aplicações Integradas na Fotogrametria Digital	67
3.2.1. Correções radiométricas nas imagens fotográficas	69
3.2.2. Filtros suavizadores seletivos	72
3.2.3. Segmentação de imagens	77
3.2.4. Operadores morfológicos	85
3.2.5. Classificação orientada aos objetos	90
3.2.6. Transformação nos Sistemas de Espaços de Cores	96
3.2.7. Interpretação das imagens	98
3.2.8. Máxima correlação cruzada	101
3.2.9. Câmara sintética	103
3.2.10. O efeito de sombreamento	109
3.2.11. A Distância Hausdorff	113
4. METODOLOGIA	128
4.1. Caracterização dos dados	128
4.2. Processamento Fotogramétrico	136
4.2.1. Calibração da câmara e retificação das imagens	139
4.2.2. Ajustamento simultâneo por feixe de raios	145
4.2.3. Determinação da área de abrangência de cada imagem	150
4.3. O modelo de análise de imagens	152
4.4. O processamento visando a análise das imagens	157
4.4.1. Fluxograma de processamento	157
4.4.2. Formação das estruturas <i>lotes e construções</i> e vínculo lotes-imagens	159
4.4.3. Construção das imagens sintéticas dos lotes	165
4.4.4. Recorte e tratamento das imagedes	167
4.5. Análise e decisão	177

5. RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASOS	182
5.1. Resultado do processamento por aerotriangulação	183
5.2. Cenários da área urbana de Matinhos – PR	189
5.3. Cenários da área urbana de Pelotas – RS	219
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	225
7. REFERÊNCIAS GERAIS	230
ANEXOS	244
ANEXO 1 – CONJUNTO DE AJUSTES A SEREM UTILIZADOS NUMA CÂMARA SONY F-828 PARA SEU USO EM AEROFOTOGRAMETRIA	245
ANEXO 2 – CÓDIGO EM C++ DAS FUNÇÕES UTILIZADAS COMO INTERVALÔMETRO	250
ANEXO 3 – FUNDAMENTOS DE CORES	252

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CENA MODELO DO PROJETO AMOBE. O DESAFIO É EXTRAIR TODAS AS FEIÇÕES CONSTRUÍDAS PELO HOMEM NA PAISAGEM.	4
FIGURA 2. TRECHO DA BASE CARTOGRÁFICA DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE MATINHOS – PR (CORTESIA: CONSELHO DO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL DO LITORAL PARANAENSE)	6
FIGURA 3. FOTO ÍNDICE DE UMA LINHA DE VÔO SOBRE A ORLA DE MATINHOS NO LITORAL DO PARANÁ. DATA DO VÔO: 21 DE JULHO DE 2005.	7
FIGURA 4. ALTERNATIVAS PARA RECOBRIMENTO AEROFOTOGRAFICO	31
FIGURA 5. CONFIGURAÇÃO APROXIMADA DE UM PLANO DE VÔO AEROFOTOGRAFÉTICO SOBRE A ÁREA URBANO DO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE – RS. (A) CÂMARA MÉTRICA (B) CÂMARA DIGITAL DE PEQUENO FORMATO.	33
FIGURA 6. ESQUEMA DE UM SISTEMA DE AEROFOTOGRAFETRIA BASEADO EM CÂMARAS DIGITAIS DE PEQUENO FORMATO	34
FIGURA 7. VISTA EXPLODIDA DA CÂMARA SONY F-828 (CONTESIA SONY CORP.)	36
FIGURA 8. ORIENTAÇÃO INTERIOR E ORIENTAÇÃO EXTERIOR DO FEIXE PROJETIVO	44
FIGURA 9. OS SISTEMAS REFERENCIAIS NA ORIENTAÇÃO INTERIOR	47
FIGURA 10. OS SISTEMAS REFERENCIAIS NA ORIENTAÇÃO EXTERIOR	51
FIGURA 11. AJUSTE PRELIMINAR DE UMA LINHA DE VÔO A UMA BASE CARTOGRÁFICA PRÉ-EXISTENTE	54
FIGURA 12. TÍPICA CONFIGURAÇÃO DO APOIO A UM BLOCO AEROFOTOGRAFÉTICO.	57
FIGURA 13. POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS TOMADAS FOTOGRÁFICAS PARA CALIBRAÇÃO	61
FIGURA 14. PRINCÍPIO DOS MODELOS NUMÉRICOS DE CORREÇÃO PARA ERROS SISTEMÁTICOS	63

FIGURA 15. OS CONCEITOS DE SÍNTESE, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS (ADAP. DE GOMES E VELHO, 1994)	68
FIGURA 16. CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DO EFEITO SISTEMÁTICO DE ESCURECIMENTO DAS BORDAS. À ESQUERDA QUADRANTE INFERIOR DIREITO DA IMAGEM ORIGINAL. À DIREITA A MESMA IMAGEM CORRIGIDA.	70
FIGURA 17. FORMA GERAL DA CURVA AJUSTADA PARA MODELAR A VARIAÇÃO DE BRILHO NA IMAGEM.	71
FIGURA 18. CURVA DE AJUSTAMENTO APLICADA SOBRE UM PERFIL AMOSTRADO DA IMAGEM MODELO DA FIGURA 16.	71
FIGURA 19. PROCESSO DE FILTRAGEM POR CONVOLUÇÃO ESPACIAL (KERNEL)	73
FIGURA 20. MÁSCARAS (KERNELS) DOS FILTROS SUAVIZADORES QUE PRESERVAM BORDAS DA IMAGEM	75
FIGURA 21. PEQUENO TRECHO DE UMA FOTOGRAFIA AÉREA DIGITAL	76
FIGURA 22. RESULTADO DA APLICAÇÃO DO FILTRO SUAVIZADOR COM PRESERVAÇÃO DE BORDAS DA IMAGEM FIGURA 21	76
FIGURA 23. IMAGEM DA FIGURA 21 SEGMENTADA POR ALGORITMO ADAPTADO DO MÉTODO DE MUNFORD E SHAH (1989)	80
FIGURA 24. PRINCÍPIO DO ALGORITMO DE SEGMENTAÇÃO <i>MEAN SHIFT</i> .	81
FIGURA 25. SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM DA FIGURA 21 (NO DETALHE A ESQUERDA) UTILIZANDO O ALGORITMO <i>MEAN SHIFT</i> .	85
FIGURA 26. EXEMPLO DE IMAGEM BINÁRIA COM UM OBJETO E O ELEMENTO ESTRUTURANTE PARA AS OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS	87
FIGURA 27. EROÇÃO DO OBJETO DA FIGURA 26 PELO ELEMENTO ESTRUTURANTE CIRCULAR 11X11.	88
FIGURA 28. DILATAÇÃO DO OBJETO DA FIGURA 26 PELO ELEMENTO ESTRUTURANTE CIRCULAR 11X11.	88
FIGURA 29. O RESULTADO DA ABERTURA E DO FECHAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS POR ELEMENTOS ESTRUTURANTES DE DOIS TAMANHOS	89
FIGURA 30. CLASSIFICAÇÃO POR MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA.	94

FIGURA 31. DIAGRAMA LÓGICO DO MODELO DE ANÁLISE DE IMAGENS (KANADE, 1980)	98
FIGURA 32. MÉTODO DA MÁXIMA CORRELAÇÃO CRUZADA APLICADO AO PROBLEMA DA BUSCA DE PONTOS HOMÓLOGOS.	102
FIGURA 33. ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE CÂMARA SINTÉTICA. FONTE: D. BROGAN. UNIVERSIDADE DA VIRGÍNIA	104
FIGURA 34. MODELAGEM DE DADOS DE UM OBJETO TRIDIMENSIONAL. FONTE (GRUPO C.G. – UFRGS)	104
FIGURA 35. PIPELINE DE VISUALIZAÇÃO DE UM OBJETO 3D NUM DISPOSITIVO GRÁFICO COMPUTACIONAL.	105
FIGURA 36. OS SISTEMAS DE REFERÊNCIA DA CÂMARA SINTÉTICA	106
FIGURA 37. MODELO SIMPLIFICADO DE PROJEÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE SOMBRAS. A ESQUERDA FONTE PUNTIFORME. A DIREITA FONTE LINEAR.	110
FIGURA 38. MODELO DE SOMBRAS NO CASO DA ILUMINAÇÃO SOLAR (FONTE: DEP. DE ASTRONOMIA DO INSTITUTO DE FÍSICA DA UFRGS)	111
FIGURA 39. ÂNGULOS DE ORIENTAÇÃO DA ILUMINAÇÃO SOLAR	113
FIGURA 40. O PROCESSO DE CÁLCULO DA DISTÂNCIA HAUSDORFF ENTRE DOIS CONJUNTOS.	115
FIGURA 41. A DISTÂNCIA HAUSDORFF ENTRE POLÍGONOS CONVEXOS	116
FIGURA 42. A DISTÂNCIA HAUSDORFF NA COMPARAÇÃO DE FORMAS.	117
FIGURA 43. DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA HAUSDORFF PARA DOIS OBJETOS RASTER (ABORDAGEM MATRICIAL).	118
FIGURA 44. O KERNEL PARA TRANSFORMAÇÃO DE DISTÂNCIA.	120
FIGURA 45. UM CONJUNTO DE PONTOS NUMA IMAGEM BINÁRIA. A TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA DA IMAGEM. O DIAGRAMA DE VORONÓI CORRESPONDENTE.	121
FIGURA 46. DETERMINAÇÃO DE HD EM FUNÇÃO DA TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA DAS IMAGENS DOS OBJETOS.	122
FIGURA 47. CÁLCULO DE VHD E CHD PARA OS MESMOS OBJETOS DA FIGURA 46.	127

FIGURA 48. LOCALIZAÇÃO DOS SÍTIOS DE ESTUDO: PELOTAS-RS E MATINHOS-PR (FONTE GOOGLE EARTH©)	129
FIGURA 49. VISTA DA CIDADE DE PELOTAS – RS E DETALHE DA LINHA DE VÔO (ARTE SOBRE IMAGEM DO GOOGLE EARTH©)	129
FIGURA 50. CIDADE DE MATINHOS – PR E DETALHE DA LINHA DE VÔO (ARTE SOBRE IMAGEM DO GOOGLE EARTH©)	130
FIGURA 51. EXEMPLO DE IMAGEM OBTIDA NO LEVANTAMENTO DA CIDADE DE PELOTAS COM USO DE UMA CÂMARA KODAK DCS 460.	131
FIGURA 52. EXEMPLO DE IMAGEM OBTIDA NO LEVANTAMENTO DA CIDADE DE MATINHOS COM USO DE UMA CÂMARA SONY F707.	132
FIGURA 53. BASE CARTOGRÁFICA DA CIDADE DE MATINHOS COM ILUSTRAÇÃO DE DADOS CADASTRAIS VINCULADOS.	134
FIGURA 54. BASE CARTOGRÁFICA DA CIDADE DE PELOTAS.	134
FIGURA 55. MODELO NUMÉRICO DIGITAL DO TERRENO DE PELOTAS	135
FIGURA 56. MODELO NUMÉRICO DIGITAL DO TERRENO DE MATINHOS	135
FIGURA 57. FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO VISANDO ORIENTAÇÃO EXTERIOR DAS IMAGENS	138
FIGURA 58. CAMPO DE CALIBRAÇÃO RETICULADO	140
FIGURA 59. CONFIGURAÇÃO DAS TOMADAS FOTOGRÁFICAS PARA CALIBRAÇÃO DA CÂMARA.	140
FIGURA 60. IMAGEM EM TONS DE CINZA DA POSIÇÃO 1 (FIGURA 59) DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO UTILIZADA	141
FIGURA 61. MND PARA A DIREÇÃO X. CÂMARA KODAK DCS 460. O PONTO BRANCO REPRESENTA O CENTRO ÓPTICO PROJETADO NO PLANO IMAGEM.	142
FIGURA 62. MND PARA A DIREÇÃO Y. CÂMARA KODAK DCS 460. O PONTO BRANCO REPRESENTA O CENTRO ÓPTICO PROJETADO NO PLANO IMAGEM.	142
FIGURA 63. COMPOSIÇÃO VETORIAL DAS CORREÇÕES EM FUNÇÃO DAS COMPONENTES APRESENTADAS NAS FIGURAS 61 E 62.	143
FIGURA 64. IMAGEM RETIFICADA DOS ERROS SISTEMÁTICOS MAPEADOS PELO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.	144

FIGURA 65. CONFIGURAÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE E LIGAÇÃO PARA O BLOCO DE IMAGENS AEROFOTOGRAFICAS DE MATINHOS	146
FIGURA 66. OS PONTOS LIMITES DA ÁREA ÚTIL DA IMAGEM UTILIZADOS PARA CALCULO DA ABRANGÊNCIA DA IMAGEM NO TERRENO.	151
FIGURA 67. MODELO DE ANALISE E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS UTILIZADO	153
FIGURA 68. UM LOTE REPRESENTADO NO DOMÍNIO DA CENA E DA IMAGEM. AS ALTERNATIVAS DE MEDIDA DE SIMILARIDADE ENTRE OS OBJETOS.	156
FIGURA 69. FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRINCIPAL: DA ENTRADA DE DADOS À DECISÃO.	157
FIGURA 70. FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DOS DADOS: EXTRAÇÃO DOS LOTES DA BASE, CARACTERIZAÇÃO E PERTINÊNCIA NO CONJUNTO DE IMAGENS.	158
FIGURA 71. FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS SINTÉTICAS DOS LOTES.	158
FIGURA 72. FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS: DO RECORTE DAS IMAGETES A CARACTERIZAÇÃO DOS OBJETOS.	159
FIGURA 73. O QUARTEIRÃO 10 DA BASE CARTOGRÁFICA DE MATINHOS	160
FIGURA 74. ILUSTRAÇÃO DO ALGORITMO DE PERTINÊNCIA DE UM PONTO A UM POLÍGONO	164
FIGURA 75. SIMULAÇÃO DA SOMBRA PRODUZIDA POR UMA CONSTRUÇÃO SIMPLES SOBRE O TERRENO.	167
FIGURA 76. ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DAS IMAGETES.	168
FIGURA 77. AMBIGUIDADES EM RELAÇÃO A TELHADOS E PAVIMENTOS.	170
FIGURA 78. DUAS IMAGETES DO MESMO LOTE, RECORTADAS DA ÁREA DE SOBREPOSIÇÃO DE DUAS FOTOS, SEGUIDAS DE SUA SEGMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES RELEVANTES.	171
FIGURA 79. PADRÕES QUE DEVEM SER EVITADOS NO PROCESSO DE CORRELAÇÃO	172

FIGURA 80. PONTOS RELEVANTES PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MÁXIMA CORRELAÇÃO CRUZADA NUMA DAS IMAGETES.	173
FIGURA 81. PONTOS EFETIVAMENTE UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DAS ALTITUDES DEVIDO SUA ALTA CORRELAÇÃO.	174
FIGURA 82. HISTOGRAMA DAS ALTITUDES CALCULADAS PELA CORRELAÇÃO SOBRE OS OBJETOS DA FIGURA 81.	176
FIGURA 83. EVIDÊNCIA DA SIMILARIDADE DAS SOMBRAS REFORÇANDO A DECISÃO SOBRE A ATUALIDADE DA CARTOGRAFIA	178
FIGURA 84. TRECHO DA BASE CARTOGRÁFICA DE MATINHOS COM POSIÇÕES DE ÁRVORES ISOLADAS E DE GRUPOS DE ÁRVORES.	178
FIGURA 85. SEQUÊNCIA DE PROCEDIMENTO APLICADOS A IMAGETE ATÉ A SUAVIZAÇÃO DO CONTO DO PELO OPERADOR MORFOLÓGICO DE FECHAMENTO.	179
FIGURA 86. BASE CARTOGRÁFICA DE MATINHOS, SOBREPOSTA ÀS TRÊS PRIMEIRAS FOTOS DO BLOCO ORTORRETIFICADAS	185
FIGURA 87. PARTE DO MOSAICO DAS IMAGENS ORTORRETIFICADAS (A IMAGEM APRESENTA TRECHOS DE 4 FOTOS)	186
FIGURA 88. DETALHE NA ÁREA LIMITE ENTRE DUAS IMAGENS	187
FIGURA 89 – TÍPICA REPRESENTAÇÃO DE UM LOTE NA BASE CARTOGRÁFICA	190
FIGURA 90. DUAS IMAGENS CONSECUTIVAS ONDE APARECE O LOTE DA FIGURA 89 SÃO IDENTIFICADAS	190
FIGURA 91. IMAGEM SINTÉTICA DO LOTE	191
FIGURA 92. IMAGETES DO LOTE.	191
FIGURA 93. AS IMAGETES DA FIGURA 92 SUAVIZADAS E SEGMENTADAS	192
FIGURA 94. ÁREAS CORRESPONDENTES A VEGETAÇÃO E SOMBRAS NA IMAGETE 2	192
FIGURA 95. PONTOS AUTOMÁTICAMENTE SELECIONADOS PARA CÁLCULO DAS ALTITUDES	193
FIGURA 96. RESULTADO FINAL DA CLASSIFICAÇÃO DO LOTE MODELO	194
FIGURA 97. OBJETOS CLASSIFICADOS COMO CONSTRUÇÕES SIMPLIFICADOS PELO OPERADOR MORFOLÓGICO	194

FIGURA 98. TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA APLICADA SOBRE A IMAGEM BINÁRIA RESULTANTE DO FILTRO MORFOLÓGICO DE BORDAS	195
FIGURA 99. REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DA ÁREA TESTE DE MATINHOS	196
FIGURA 100. RESULTADO DA FOTOINTERPRETAÇÃO MANUAL DOS LOTES	197
FIGURA 101. RESULTADO DA ANÁLISE AUTOMÁTICA DOS LOTES	198
FIGURA 102. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NA FIGURA 100 E 101.	199
FIGURA 103. CASO 1	201
FIGURA 104. CASO 2	202
FIGURA 105. CASO 3	204
FIGURA 106. CASO 4	204
FIGURA 107. CASO 5	205
FIGURA 108. CASO 6	206
FIGURA 109. CASO 7	207
FIGURA 110. CASO 8	208
FIGURA 111. CASO 9	209
FIGURA 112. CASO 10	209
FIGURA 113. CASOS 11 e 12	213
FIGURA 114. CASOS 13, 14 e 15	214
FIGURA 115. CASOS 16 e 17	215
FIGURA 116. CASOS 18 e 19	216
FIGURA 117. CASOS 20, 21 e 22	217
FIGURA 118. CASOS 23 e 24	218
FIGURA 119. FAIXA DE VÔO SOBRE PELOTAS SOBREPOSTA DA BASE CARTOGRÁFICA	219
FIGURA 120. BASE CARTOGRÁFICA DOS OITO QUARTEIRÕES UTILIZADOS PARA TESTE	220
FIGURA 121. MOSAICO DE IMAGENS ORTORRETIFICADAS DOS OITO QUARTEIRÕES UTILIZADOS PARA TESTE	221
FIGURA 122. PROCESSAMENTO DOS DADOS DO QUARTEIRÃO 3 – PELOTAS	223

FIGURA 123. ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DA MEDIDA DE SIMILARIDADE AO QUARTEIRÃO 3 – PELOTAS	224
FIGURA 124. ESPECTRO DA RADIAÇÃO VISÍVEL.	253
FIGURA 125. TÍPICO ESPECTRO PARA UMA DETERMINADA COR.	253
FIGURA 126. UMA PEQUENA IMAGEM COLORIDA E SUAS BANDAS DAS CORES PRIMÁRIAS.	255
FIGURA 127. FUNÇÕES <i>MATCHING</i> PARA O SISTEMA TRIESTÍMULO.	256
FIGURA 128. CUBO RGB. FONTE: SWINBURNE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (SWINBURNE SITE)	256
FIGURA 129. ILUSTRAÇÃO DAS DIVERSAS PERCEPÇÕES DE UMA IMAGEM EM FUNÇÃO DO DISPOSITIVO DE EXIBIÇÃO	259
FIGURA 130. SISTEMA TRIESTÍMULO DO CIE: COORDENADAS X,Y E Z.	260
FIGURA 131. DIAGRAMA CROMÁTICO DO CIE. (CORTESIA DE PHOTO RESEARCH, INC.)	261
FIGURA 132. DIAGRAMAS CROMÁTICOS DO CIE. ESPAÇO DE CORES XY E U'V', CIELUV. (CORTESIA DE PHOTO RESEARCH, INC.)	262
FIGURA 133. DIAGRAMA CROMÁTICO DE DIVERSOS ESPAÇOS DE CORES E SUA REFERÊNCIAS DE BRANCO. FONTE: SUSSTRUNK, BUCKLEY AND SWEN, 2006.	263

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CIDADES DO RS CONSULTADAS SOBRE SUA CARTOGRAFIA CADASTRAL.	13
TABELA 2. RESUMO DOS RESULTADOS DA CONSULTA SOBRE CARTOGRAFIA CADASTRAL NO RS	14
TABELA 3. INVENTÁRIO DAS AUTORIZAÇÕES DE VÔOS SOBRE O RS	18
TABELA 4. ORÇAMENTOS A APRESENTADOS POR TRÊS EMPRESAS PARA UM SERVIÇO DE AEROLEVANTAMENTO E CARTOGRAFIA DE UMA ÁREA DE 10 KM ²	21
TABELA 5. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DA CÂMARA SONY F-828	40
TABELA 6. CONFIGURAÇÃO DE UM TRECHO DE MENSAGEM NMEA	41
TABELA 7. ASSINATURAS ESPECTRAIS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	95
TABELA 8. A META DA FASE DE SEGMENTAÇÃO NOS DIVERSOS DOMÍNIOS	100
TABELA 9. ESTRUTURA DE DADOS COM ORDENAMENTO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS OBJETOS DA FIGURA 46 PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA PARCIAL DE HAUSDORFF E DA VIZINHANÇA POR HD.	125
TABELA 10. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO PARA A CÂMARA KODAK DCS460 (OLIVEIRA, 2005)	144
TABELA 11. VALORES INICIAIS PARA PARÂMETROS DO BLOCO	146
TABELA 12. COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE PARA INJUNÇÃO DO BLOCO	147
TABELA 13. VALORES INICIAIS PARA PARÂMETROS DE AJUSTAMENTO DO BLOCO	147
TABELA 14. PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DAS FOTOS	149
TABELA 15. PRECISÃO DOS PARÂMETROS ESTIMADOS NA TABELA 14	149
TABELA 16. LIMITES NO TERRENO DE CADA FOTO DO VÔO MATINHOS	151
TABELA 17. DADOS FILTRADOS PARA OS LOTES.	162

TABELA 18. DADOS FILTRADOS DAS EDIFICAÇÕES.	163
TABELA 19. ÍNDICE DE IMAGENS ASSOCIADAS AOS LOTES	165
TABELA 20. VALORES PARA INDICADOR DE CONFIANÇA ASSOCIADO AO NÚMERO DE PONTOS	175
TABELA 21. RESULTADO DA DETERMINAÇÃO DA ALTITUDE POR CORRELAÇÃO E USO DA INTERSECÇÃO FOTOGRAFÉTRICA	176
TABELA 22. VALORES DE TOLERÂNCIA PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA HAUSDORFF POR VIZINHANÇA E DO LIMITE PARA ACEITAÇÃO DA HIPÓTESE DE ATUALIDADE DO LOTE	180
TABELA 23. RESÍDUO NO ESPAÇO IMAGEM DOS PONTOS DE CONTROLE DO BLOCO DE MATINHOS	187
TABELA 24. RESÍDUOS NAS COORDENADAS DOS 8 PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO BLOCO DE MATINHOS	188
TABELA 25. RESÍDUOS NAS COORDENADAS DOS 8 PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO BLOCO DE MATINHOS	188
TABELA 26. ALGUMAS DIFERENÇAS DE MEDIDAS ENTRE A BASE CARTOGRÁFICA E FEIÇÕES NAS IMAGENS ORTORRETIFICADAS	188
TABELA 27. RESULTADO DA ANÁLISE DE IMAGENS CONFRONTADO COM A FOTOINTERPRETAÇÃO VISUAL	200
TABELA 28. ANÁLISE DOS CASOS 12 A 25	210
TABELA 29. RESULTADO DA ANÁLISE DE IMAGENS CONFRONTADO COM A FOTOINTERPRETAÇÃO VISUAL PARA O CENÁRIO DE PELOTAS	222
TABELA 30. NÚMERO DE IMAGENS ARMAZENADAS EM UM MICRODRIVE DE 2GB EM FUNÇÃO DO FORMATO DO ARQUIVO	247
TABELA 31. VALORES DO BRANCO REFERÊNCIA PARA UM REFLETOR DIFUSO IDEAL. FONTE CIE.	261

RESUMO

Esse trabalho trata, fundamentalmente, do uso fotogramétrico de imagens obtidas por câmaras digitais de baixo custo. Ele estende-se por muitos dos seus domínios, focado em sua relação com o problema da cartografia cadastral. Sua justificativa é apresentada sob a forma de uma breve análise do preocupante cenário da cartografia de grande escala das áreas urbanas dos municípios brasileiros e do papel da aerofotogrametria como fator indutor desse cenário e ao mesmo tempo como tecnologia mais viável a sua reversão. Um sistema aerofotogramétrico de baixo custo, baseado nas câmaras fotográficas digitais, estará sendo projetado e especificado. Essas câmaras que tomaram de assalto o mercado nesses anos de início de milênio constituirão o principal instrumento de medidas aqui utilizado e estarão subsidiando um conjunto de fotos para a realização de uma série de experimentos com processamento e análise de imagens. Assim, uma extensa mas necessária fundamentação de diversos tópicos dessas matérias da ciência da computação estará sendo apresentada, em conjunto com uma breve revisão da modelagem fotogramétrica adaptada às imagens digitais. O problema específico que será abordado é a automação da detecção de mudanças na paisagem urbana, ao nível de lote, ou seja, dada uma base cartográfica digital com alguns anos de obsolescência e um bloco aerofotogramétrico de imagens digitais atual, o sistema implementado deverá estar habilitado a determinar automaticamente em que lotes ocorreram mudanças significativas das construções ali existentes. Uma série de clássicas ferramentas estarão sendo integradas para essa finalidade. O conceito da distância Hausdorff será introduzido como ótima alternativa para métrica de similaridade, permitindo avaliar o quanto a representação vetorial e matricial dos mesmos objetos se assemelham. Uma versão piloto, quase integralmente operacionalizada no ambiente gráfico do sistema MatLab© foi utilizada para efetuar testes com dois cenários reais, um na cidade de Matinhos no litoral do Paraná e outro na cidade de Pelotas no sul do estado do Rio Grande do Sul. Resultados promissores foram obtidos e apontam no sentido da possibilidade de uso de tal metodologia para agilização do processo de atualização cartográfica de ambientes urbanos.

Palavras-chave: fotogrametria digital; cartografia cadastral; análise de imagens; distância Hausdorff; calibração de câmaras digitais

ABSTRACT

The cartographic use of photogrammetric images obtained by low cost digital cameras is the central scope of this research, which has special emphasis on the configuration of photogrammetric systems, calibration of cameras, development of mathematical models and algorithms for image synthesis, contributing to a better image processing and understanding. The motivation of this study is based on the analysis of the great scale cartographic scenery of Brazilian urban areas, where the aerophotogrammetry system is expected to play an important role. Some prospective data is also presented.

The main objective of this study is to propose an automatic method to detect changes in the urban landscape, specially the changes that happen in the level of lots. For this, a digital cartography obtained some years ago and a current set of images of the same area were compared.

A low cost aerophotogrammetric system based on ordinary digital cameras was configured and specified. A through revision on the computer science and on photogrammetric models adapted to the digital images provided the base for the study, indicating several classical tools to accomplish this objective. The concept of the Hausdorff distance is introduced as an alternative method for metric of similarity, allowing the evaluation of the compatibility between the vectorial and matricial representation of the lots and its contents. The beta version of a implemented system in the MatLab graphic environment is used for data analysis of two Brazilian cities: Matinhos, in the coastal area of Paraná State, and Pelotas, in the south of Rio Grande do Sul State. The obtained results were promising, and indicate the proposed method as the next step forward in updating the cartographic information of urban areas.

Keywords: digital photogrammetry; cadastral cartography; image understand; Hausdorff distance; digital camera calibration

1. INTRODUÇÃO

A Fotogrametria, técnica secular para medição precisa sobre fotografias, ainda hoje é fértil campo para investigação científica. São inúmeros os temas agregados em função da disponibilização de novos instrumentos eletrônicos digitais, do processamento das imagens fotográficas, da contínua busca de automação dos processos, da efficientização dos recursos, do estabelecimento de metodologias que levem a um produto mais preciso, das alternativas para tornar esse produto economicamente mais acessível. Engendram-se novas soluções, novos métodos. Permeia-se, assim, pela óptica moderna, eletrônica digital, sensoriamento remoto e computação gráfica, ou melhor, pela ciência da computação em geral. Enfim, segue a tendência natural de muitas das áreas do conhecimento contemporâneo: a interdisciplinaridade.

Por extensão, a aerofotogrametria tem registrado nas últimas décadas maiúscula evolução tecnológica. Especialidade explorada extensamente pela cartografia traz consigo o fascínio das fotografias da superfície da Terra em toda a sua diversidade e complexidade. Exerce sobre o homem uma sensação única de conhecer e explorar com o mais alto grau de realismo os locais para onde sua necessidade ou curiosidade se dirige.

Face à inserção no mercado das imagens de satélite de alta resolução, como a dos sensores que equipam os satélites IKONOS®, disponibilizadas pela empresa Space Imaging®, e QUICKBIRD®, da DigitalGlobe®, não foram incomuns as previsões de obsolescência dos sistemas aerofotogramétricos e é fato que o apelo comercial e a disputa por mercados têm colocado em confronto tais tecnologias. No entanto persevera a vantagem dos sistemas fotogramétricos em muitos dos produtos necessários a gestão do espaço geográfico. Ainda não é possível comparar a qualidade radiométrica, que se traduz na nitidez com que os objetos são registrados, na gama de cores mais reais, em gradientes mais evidentes e superfícies mais uniformes.

E mesmo a qualidade geométrica do produto fotogramétrico é ainda muito superior. Isso tanto pela resolução espacial, que pode ser selecionada em função da altura de vôo, como em função do ângulo de visada, da possibilidade de registro altamente preciso da imagem e da condição inequívoca do poder estereoscópico, com mínima distorção visual e controle pleno do exagero vertical.

Tais vantagens advêm de um conjunto de fatores dos quais a posição relativa da plataforma de transporte é um dos principais. As aeronaves estão muito mais próximas aos alvos, a radiação atravessa um trecho menor da camada atmosférica. A possibilidade de escolher o melhor momento para efetuar a cobertura, as melhores condições climáticas, a hora do dia mais adequada a determinada aplicação ainda são privilégios dos sistemas aerofotogramétricos. Ou seja, salvo condições muito especiais, um avião pode estar onde, quando e como se necessita.

A atividade aerofotogramétrica é tão potencialmente importante que é considerada elemento de segurança nacional e sob tal argumento sua utilização é rigorosamente controlada. Porém, tal controle no Brasil tornou-se o principal empecilho a sua plena aplicação. A legislação corrente data das décadas de 60 e 70 e em sua vigência um reduzido número de empresas se consolidaram, sob a égide do controle militar e do estado cartorial.

Tais empresas dominam política, econômica e tecnologicamente o mercado e o quadro observado pode ser qualificado como paradoxal: algumas empresas fazendo grandes investimentos em instrumental e qualificação de recursos humanos, serviços e produtos sendo oferecidos a alto custo comparado à deficiência da clientela (em geral o próprio serviço público) e um número reduzido de levantamentos registrados face à ordem de grandeza do território nacional, por sua vez absolutamente carente de informação cartográfica.

Afastando-se um pouco desse cenário de mercado, nos meios acadêmicos o principal ponto de convergência é a aproximação ao que se convencionou chamar de análise de imagens e visão computacional. Resguardando termos técnicos próprios de cada área do conhecimento,

pode-se definir o objeto do estado da arte da técnica fotogramétrica como a busca da automatização do processo de fotointerpretação. E esse é um grande desafio, de alta complexidade e um tema ainda em aberto. Como de resto é difícil, em todas as suas variações, reproduzir a capacidade física e mental do homem.

E mais ainda, quando referente ao conhecimento do sistema visual humano, de seu poder de capturar, processar e quase instantaneamente interpretar uma cena tridimensional colorida e nela definir ordem de profundidade e orientação, vencer obstruções, adaptar-se a condições diversas de iluminação, reconhecer padrões e objetos, perceber movimentos e dela construir uma descrição semântica tão simples ou complexa quando o queira, expressar essa descrição sob signos diversos e armazená-la seletivamente para uso futuro.

A ciência ainda garimpa soluções para modelar e reproduzir tais funções. E se algumas das soluções apresentadas já são operacionais para reconhecimento de objetos específicos, com características controladas e/ou parametrizáveis, não se pode dizer o mesmo das cenas aerofotogramétricas como as de paisagens urbanas, onde a heterogeneidade dos alvos, a extensão de seu domínio e o grau de precisão e acurácia que a cartografia exige são notáveis.

Apenas a título de exemplo cabe lembrar um desafio lançado a dez anos pelo projeto pioneiro AMOBE (Automation of Digital Terrain Model Generation and Man-made Object Extraction from Aerial Images) do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, na Suíça: reconstituir automaticamente da cena da figura 1 os objetos construídos pelo homem. Na seqüência de sua implantação o AMOBE publicou uma referência importante sobre o tema, Gruen et al (1995) e Gruen (1997). E desde então muitas propostas com soluções parciais têm sido apresentadas, porém nenhuma comparável à resultante do trabalho de um fotointérprete.

FIGURA 1. CENA MODELO DO PROJETO AMOBE. O DESAFIO É EXTRAIR TODAS AS FEIÇÕES CONSTRUÍDAS PELO HOMEM NA PAISAGEM.



É interessante também observar o texto introdutório de diversas publicações afins. Em 1995, no *site* do AMOBE, foi publicado:

“The 3-D reconstruction of houses and other man-made objects is currently a very active research area and an issue of high importance to many users of Geographic Information Systems (GIS), including urban planners, architects, and telecommunication and environmental engineers.”

“A reconstrução tridimensional de casas e outros objetos construídos pelos homens é atualmente uma área de pesquisa muito ativa e tema de alta relevância para muitos usuários de Sistemas de Informações Geográficas, incluindo urbanistas, arquitetos e engenheiros ambientais e de telecomunicações.”

Sete anos depois, afirmativa equivalente pode ser vista em Suveg e Vosselman (2002). E na próxima edição (outubro de 2006) da *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, revista qualificada da Blackwell com conteúdo voltado a soluções para representação das paisagens e estruturas urbanas, pode-se ainda encontrar Sales Dias et al (2006):

“The main challenge is to compute the relevant information—building’s height and volume, roof’s description, and texture—

algorithmically, because it is very time consuming and thus expensive to produce it manually for large urban areas.”

“O principal desafio é computar informações relevantes – altura de edifícios e seus volumes, descrição de telhados e suas texturas – através de algoritmos, pois é ineficiente e muito caro produzi-los manualmente para grandes áreas urbanas.”

É evidente, pois, o quanto é esse um tema recorrente há mais de dez anos e ainda alvo das atenções dos pesquisadores da Fotogrametria e das ciências da computação.

O presente estudo abarca sistematicamente algumas das questões acima resumidas. Parte de uma breve análise do cenário da aplicação da aerofotogrametria na cartografia nacional, como uma justificativa para o uso de sistemas mais flexíveis, de menor custo de aquisição e de valor operacional mais razoável. E avança sobre um tema específico da automação de processos: o caso da atualização da cartografia cadastral de áreas urbanas.

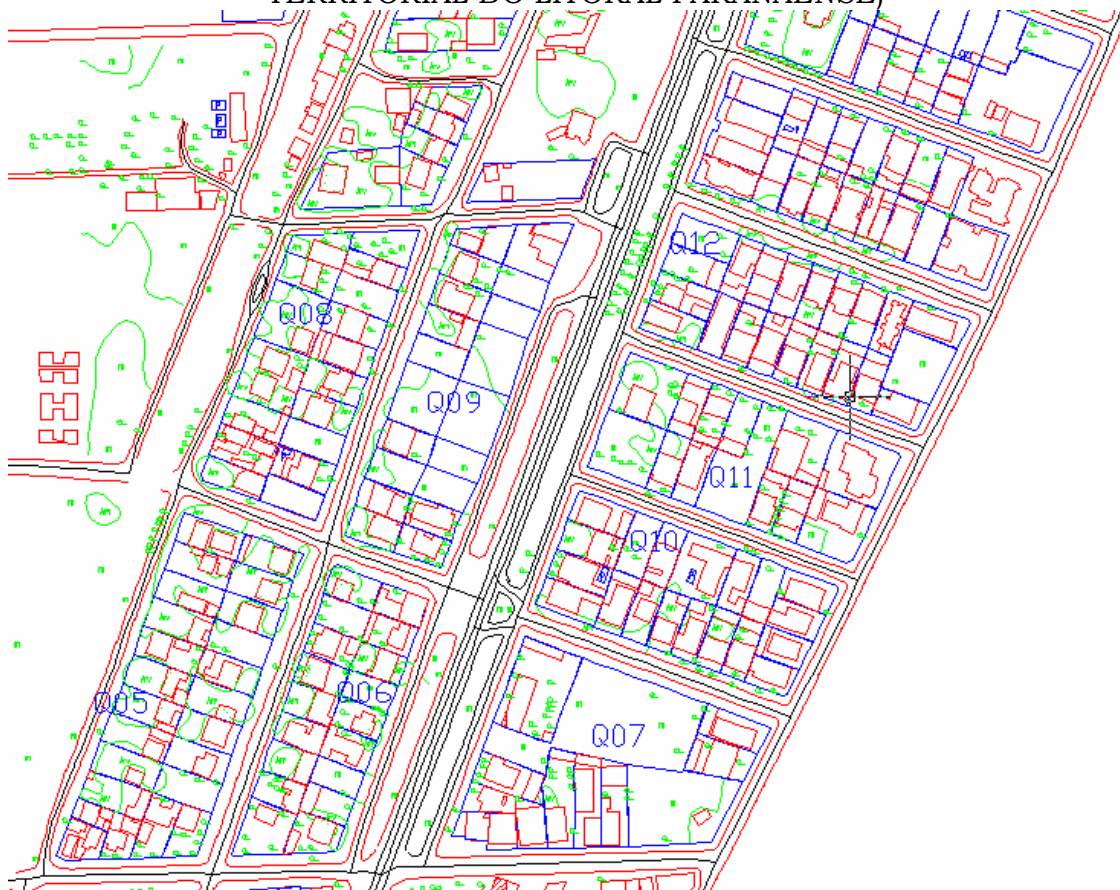
Atente-se por um instante ao problema descrito na seqüência, hoje comum para quem manipula cadastros de áreas urbanas, como as prefeituras e as concessionárias de serviços públicos, e com tendência a se tornar a prática de tais agentes.

Admite-se dispor de um cadastro técnico de uma área urbana, no qual a base cartográfica digital é elemento fundamental. Por suposição, tal base cartográfica encontra-se defasada de alguns anos. Evidentemente, se essa defasagem for muito grande a solução mais adequada pode se tornar a realização de uma nova restituição completa.

Essa base cartográfica digital, integrada ao ambiente de um SIG (Sistema de Informações Geográficas) costuma ser composta de um grande número de níveis de informação. Dentre esses níveis, os mais críticos no processo de atualização costumam ser os relativos às menores parcelas do espaço urbano, ou seja, os lotes e as construções neles inscritas.

Considerem-se então esses níveis de informação como alvo do processo. A figura 2 é um exemplo do produto descrito.

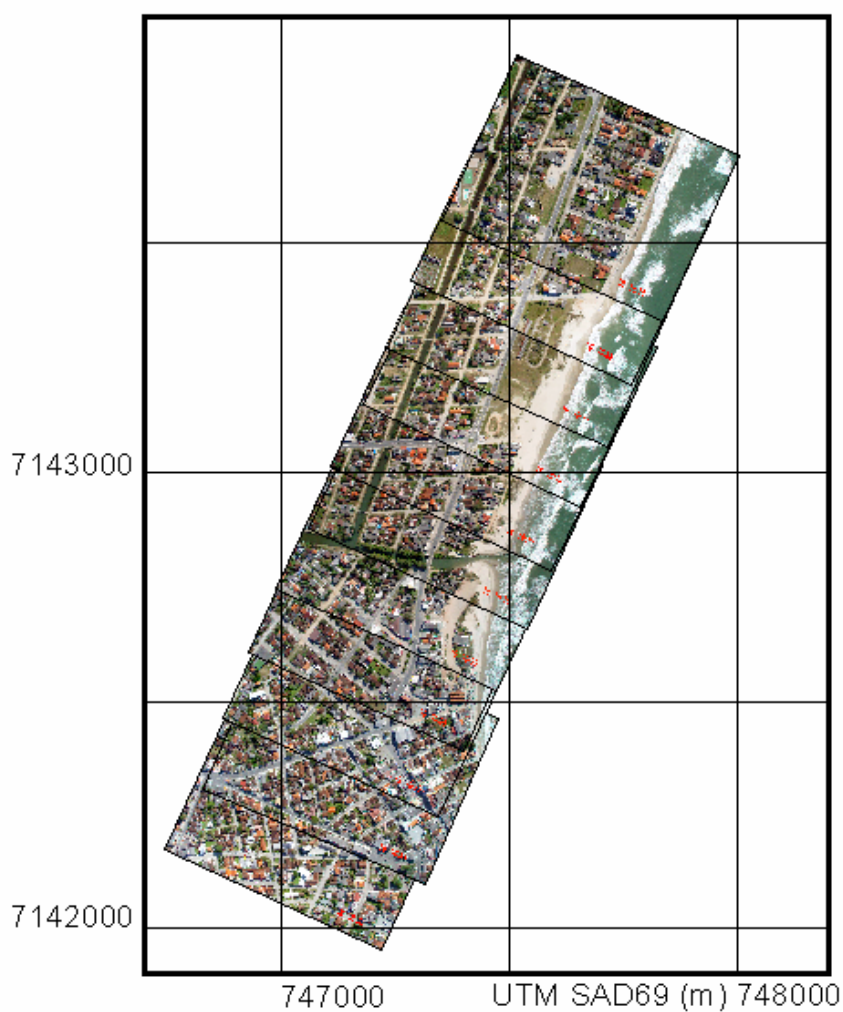
FIGURA 2. TRECHO DA BASE CARTOGRÁFICA DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE MATINHOS – PR (CORTESIA: CONSELHO DO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL DO LITORAL PARANAENSE)



Agora presuma-se que a referida área tenha sido alvo de um levantamento aerofotogramétrico e que as imagens digitais provenientes desse serviço tenham sido devidamente processadas segundo a técnica fotogramétrica e sejam conhecidos todos os parâmetros de sua orientação. A figura 3 mostra a típica configuração de uma linha de voo com imagens como as referidas. O processo de atualização da base cartográfica por essas imagens pode ser realizado manualmente segundo métodos estabelecidos ao longo de anos de prática, por comparação simples das informações pictóricas, com uso de ferramentas de sobreposição em ambiente como o dos sistemas fotogramétricos digitais. É então lógico propor a construção de uma

ferramenta computacional que efetue tal comparação e determine automaticamente onde alterações ocorreram.

FIGURA 3. FOTO ÍNDICE DE UMA LINHA DE VÔO SOBRE A ORLA DE MATINHOS NO LITORAL DO PARANÁ. DATA DO VÔO: 21 DE JULHO DE 2005.



Esse é um desafio bastante interessante e com alto grau de complexidade, no entanto, bem menos pretensioso do que o proposto no início dessa introdução, quando as feições deveriam ser obtidas diretamente

das imagens com um mínimo de injunções. Donde se podem prever alguns bons resultados e até onde se pôde pesquisar, com alguma originalidade.

1.1. Objetivos

Os argumentos acima permitem que então seja estabelecido o objetivo primeiro desse estudo e a tese aqui sustentada.

Objetivo principal: desenvolver uma metodologia computacional para automação da detecção de mudanças nas áreas urbanas, ao nível de lote, utilizando como referência de um estado inicial a cartografia digital pregressa e como referência do estado atual um recobrimento aerofotogramétrico.

No intento de prover solução a esse problema, evidentemente, uma série de ferramentas clássicas das ciências físicas, matemáticas e computacionais serão utilizadas. Técnicas já conhecidas serão adaptadas, integradas e associadas a algumas outras aqui sugeridas e nisso uma série de objetivos secundários deverão ser atingidos. Entre tantos:

- utilizar dados provenientes de câmaras digitais de pequeno formato, baixo custo e, a princípio, não métricas, como fonte principal da informação aerofotogramétrica;
- propor uma estrutura de organização dos dados da base cartográfica e do cadastro urbano, relevantes ao objetivo traçado, de forma a facilitar seu uso no processamento;
- buscar a otimização dos algoritmos de síntese, processamento e análise de imagens conhecido o pressuposto das características das imagens aerofotográficas digitais e das propriedades do espaço geográfico, cuja principal característica é a fragmentação geométrica previsível e conhecida a priori. Simplificadamente, isso significa que o homem delimita o território em lotes, nesses lotes estão os objetos do cadastro e alvos do processamento.

- propor um método de comparação das formas dos objetos representados em dois domínios distintos: vetorial e matricial, ou, real e discreto, ou ainda, mapa e imagem.

Seguirão outros, mas essencialmente esses serão os principais.

Ainda foi considerado interessante efetuar uma análise mais fortalecida acerca da necessidade de se tornar ordinária (regular, periódica, costumeira) a atividade aerofotogramétrica no âmbito dos municípios brasileiros e robustecer a defesa do uso de sistemas de baixo custo, como deveras vem sendo feito por alguns segmentos do meio acadêmico já há algum tempo. E isso é também reflexo da atividade estar sendo extensamente utilizada em alguns países de vanguarda tecnológica (como no Canadá, Estados Unidos, na Espanha e na Austrália) para solução adequada a quem tem limitada capacidade de investimento.

Esse seria assim um objetivo adjunto do estudo: caracterizar o potencial de utilização da aerofotogrametria baseada em câmaras digitais de baixo custo, cuja explosão de vendas no comércio comum é fato concreto, cuja qualidade tem evoluído bastante e ao qual se tem agregados recursos tecnológicos há pouco tempo inimagináveis.

1.2. Estrutura do texto

No Capítulo 2, subsequente, será apresentada uma visão particular do cenário da cartografia cadastral nacional e do papel da aerofotogrametria no seu estabelecimento. Serão interpostos também argumentos relativos ao uso de câmaras digitais de pequeno formato, comumente ditas não métricas, em levantamentos com objetivos cartográficos e serão estabelecidos os componentes de um sistema aerofotogramétrico baseado nesse tipo de dispositivo.

O Capítulo 3 é integralmente dedicado ao desenvolvimento dos princípios físicos e matemáticos envolvidos nos procedimentos aerofotogramétricos relevantes para a seqüência da pesquisa. Além disso

serão referidas as bases dos principais algoritmos que foram, adaptados, integrados e implementados para o teste da hipótese principal desse estudo: a automação da detecção de mudanças num cenário urbano.

No Capítulo 4 está a descrição detalhada da metodologia elaborada para solução do problema e no Capítulo 5 os resultados da aplicação dessa metodologia, com indicativos de eficiência, análise de alguns casos notáveis e de exceções importantes.

Finalmente, no Capítulo 6 estão as conclusões consolidadas sobre a proposta feita e executada, e também sobre os resultados auferidos. Também estão registrados os principais pontos limitantes da solução descrita e um conjunto de recomendações para que se obtenha resultados melhores em trabalhos futuros.

2. AEROFOTOGRAMETRIA DE BAIXO CUSTO

2.1. Cartografia cadastral: uma breve descrição do cenário brasileiro

A vigente configuração do Sistema Cartográfico Nacional já não é capaz de atender às demandas atuais e emergentes dos diversos usuários (públicos e privados) da Cartografia, incorporar capacidades e tecnologias ou mesmo promover a melhoria da qualidade dos produtos cartográficos gerados por diversas entidades. Essa observação está num documento oficial da CONCAR (*site* do Concar, 2006), Comissão Nacional de Cartografia, do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, órgão que por força de lei e por ação contínua nos últimos 30 anos regula a atividade de mapeamento no Brasil. De forma sucinta o texto expressa o sentimento da maioria da comunidade cartográfica nacional.

Representar o espaço territorial através das cartas e mapas é, e sempre foi, atividade nobre, fundamental para organização das sociedades e necessita ação seletiva, progressiva e coordenada, além, evidentemente, de investimentos para que seja levada a bom termo.

No Brasil, no entanto, especialmente nas últimas décadas, o que se vê vem de encontro a essa linha de ação: baixos investimentos ou investimentos eivados de improbidade; legislação incompatível com a realidade tecnológica e com as demandas da sociedade; mercado restrito com soluções de difícil e longo financiamento, pequeno e geograficamente concentrado número de empresas atuando no mercado, valores de mercado formados sob regras pouco claras, além da existência de algumas propostas inseguras, imprecisas e inadequadas; não se pode calar ainda acerca da existência de administradores públicos que ignoram, por eleição de prioridades ou comodismo, a importância da informação cartográfica.

Esse quadro levou o país há uma chamada *defasagem cartográfica*, nas palavras de autores como Pereira et al, 2003. O resultado disso: dificuldade na implantação de projetos nas mais diversas áreas das atividades humanas, com o aumento dos custos nas etapas iniciais de

estudos de viabilidade, falhas no planejamento, problemas na gestão dos projetos, inclusive na sua fundamental gestão ambiental.

Quantificar essa *defasagem cartográfica* somente é possível em relação à chamada cartografia sistemática, de pequena escala, acima de 1:25000. E uma breve consulta às cartas índice do mapeamento topográfico do território nacional (*site* do IBGE) aponta para dados restituídos há 30 anos, em sua quase totalidade ainda em mídia impressa e sem esforço sistematizado de atualização. No que se refere à cartografia urbana, e/ou cadastral, sequer dados fidedignos existem.

Num inventário expedito, efetuado por consulta direta a 32 prefeituras (Tabela 1) do estado do Rio Grande do Sul no mês de maio do corrente ano, observa-se um cenário obsoleto. Foram enviadas mensagens eletrônicas às Secretarias de Planejamento, ou equivalente, com as seguintes questões:

De que ano é a base cartográfica de seu município?

Em outras palavras, quando foi realizado o último levantamento com o objetivo de atualização cadastral e que resultou num mapa da área urbana em grande escala (mapas em que aparecem os lotes da área urbana)?

- a. anterior a 1980
- b. entre 1981 e 1990
- c. entre 1991 e 1995
- d. entre 1996 e 2000
- e. posterior a 2001

Em que base tecnológica ela foi concebida?

- a. levantamento topográfico convencional (utilizando instrumento de campo como trenas, teodolitos, níveis, distanciômetros, estações totais)
- b. levantamento aerofotogramétrico (com base em fotografias aéreas)
- c. imagens orbitais (com base em imagens de satélites)
- d. outras.

Um resumo das respostas recebidas (20 das 32 prefeituras responderam) está na Tabela 2.

TABELA 1. CIDADES DO RS CONSULTADAS SOBRE SUA CARTOGRAFIA CADASTRAL.

Nro.	Cidade	População (2002)
1	Porto Alegre	1.428.696
2	Alegrete	87.877
3	Alvorada	210.233
4	Arroio Grande	19.780
5	Bagé	121.299
6	Bento Gonçalves	102.452
7	Butiá	21.337
8	Cachoeira do Sul	89.395
9	Cachoeirinha	119.699
10	Camaquã	63.735
11	Canela	39.153
12	Carazinho	61.315
13	Caxias do Sul	404.187
14	Cruz Alta	68.804
15	Esteio	86.000
16	Farroupilha	61.799
17	Frederico Westphalen	27.902
18	Gravataí	264.953
19	Ijuí	78.990
20	Imbé	15.306
21	Itaqui	42.374
22	Jaguarão	31.558
23	Montenegro	59.591
24	Novo Hamburgo	255.317
25	Passo Fundo	185.279
26	Pelotas	342.513
27	Rio Grande	195.392
28	Santa Cruz do Sul	117.949
29	Santa Maria	266.042
30	Santa Rosa	69.232
31	Santana do Livramento	97.488
32	Viamão	256.709

TABELA 2. RESUMO DOS RESULTADOS DA CONSULTA SOBRE CARTOGRAFIA CADASTRAL NO RS

	Período mais freqüente da última carta cadastral	Tecnologias incorporadas a rotina cartográfica
Capital	1985-1990	Levantamento aerofotogramétrico e topográfico
Cidades com mais de 100000 habitantes	1985 – 1990	Levantamento aerofotogramétrico e topográfico
Cidades com número de habitantes entre 50000 e 100000	1980 – 1985	Levantamento aerofotogramétrico e topográfico
Cidades com menos de 50000 habitantes	1980 – 1985	Não definido

Muitas das administrações consultadas (16) relataram estar em pleno processo de atualização/execução de seus planos diretores, função da exigência do recentemente aprovado Estatuto das Cidades. Com isso estariam investindo na busca de informações para permitir estudos relacionados ao uso do solo urbano. É de se considerar, pois, que algumas delas invistam na elaboração de uma cartografia cadastral num breve intervalo de tempo. Ainda assim, o cenário não é animador.

O entendimento da cartografia cadastral e de sua jurisdição remete a algumas referências, como as já sumarizadas por Lima (2002). Fundamentalmente, é incontestável a responsabilidade do município na sua construção, consolidação e manutenção, vide a própria Constituição da República, promulgada em 5 de outubro de 1988 (Augusto, 2004):

- Inciso VIII do Artigo 30: compete aos Municípios, entre outras obrigações, “promover, no que couber, adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, parcelamento e da ocupação do solo urbano”.

- Artigo 182: “A política de desenvolvimento urbano, executada pelo poder público municipal, conforme diretrizes gerais fixadas em lei, tem por

objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes.”

Evidentemente, a política de desenvolvimento urbano e o adequado ordenamento territorial somente são viáveis mediante o conhecimento preciso do território administrado. Assim, tecnicamente, se impõe a necessidade de um cadastro.

Cadastro é, segundo a Federação Internacional de Geômetras – FIG, FIG (2003), um “sistema de informações da terra, atualizado e baseado em parcelas, contendo um registro de interesses sobre a mesma”. Ainda, “contém uma descrição geométrica de parcelas de terras ligadas a outros registros, que descrevem a natureza dos interesses e a propriedade ou o controle desses interesses e, freqüentemente, o valor das parcelas e suas benfeitorias”.

Por conseqüência, cabe a Prefeitura Municipal o estabelecimento de um cadastro, em última instância, senão para o bem administrar de sua comunidade, para cumprir o que por lei lhe é imposto.

E é um erro restringir a importância do cadastro a servir de base para o lançamento dos tributos imobiliários, como o IPTU. O cadastro deve ser a maior fonte de informação para as mais diversas análises e para tomada de decisões nas áreas de desenvolvimento urbano e ambiental das cidades, na identificação de padrões de uso e ocupação do solo e no monitoramento de intervenções urbanas e políticas sociais. (Erba, 2005)

É de uso corrente, recomendado teoricamente e pela boa prática, que o cadastro seja composto por uma documentação gráfica e por registros descritivos de cada unidade nela identificada. A evolução tecnológica tem construído ferramentas computacionais para permitir a segura implementação desse modelo e pode-se afirmar, sem demagogismo, serem esses sistemas o alvo do maior interesse das pessoas responsáveis nas administrações públicas pelo planejamento e gestão do território municipal.

Essa proposta de ação está apresentada e é de conhecimento público. Exige-se vontade política e investimento. Investimento em infra-estrutura, equipamentos e conhecimento, esse último concretizado na forma como os

equipamentos estão configurados para auxílio à gestão e na qualificação dos recursos humanos para sua manipulação. Também, investimentos pesados em uma época inicial, um t_0 do cadastro, na aquisição de informação digna de fé pública.

Ainda, não menos investimento contínuo, ao longo do tempo, na manutenção desse cadastro. É importante, após essa argumentação, lembrar o papel da Fotogrametria no processo, como técnica mais adequada para aquisição de dados espaciais nas escalas exigidas pelas mais complexas demandas, com a precisão expressa pela lei e com melhor relação tempo-custo-benefício, quando comparadas com alternativas existentes (Souza, 2001).

É nessa fase da solução, hoje apresentada às administrações municipais, que essa pesquisa se concentra como já foi dito no capítulo introdutório.

2.2. São caros os serviços de aerofotogrametria?

A alta qualidade dos sistemas fotogramétricos foi resultado de um século de pesquisa e desenvolvimento. A conformação de lentes com geometria acurada, elementos de eletro-mecânica de precisão, sistemas pneumáticos, sistemas de controle e compensação, dispositivos metrológicos, a tecnologia de materiais, além da otimização de processos, da modelagem matemática dos erros e dos métodos numéricos permitiram a aplicação em escala de produção da fotogrametria analógica e semi-analítica e analítica. E sob tais métodos foi gerada uma gigantesca massa de informações cartográficas.

O advento e popularização dos sistemas computacionais trouxeram, num primeiro momento, a fotogrametria analítica, ainda mais precisa e produtiva. Toda essa produção, como ainda hoje corrente, baseia-se na imagem gerada sobre uma emulsão fotossensível, mecanicamente suportada por uma lâmina de acetato: o filme fotográfico. Flexível, mas com alguma

estabilidade dimensional. Mantido plano no momento da exposição e registrado sobre ele marcas indelévels do corpo rígido da câmara, permite a precisa extração da geometria dos objetos nele identificáveis.

Evidentemente essa condição não é facilmente obtida em qualquer câmara. A configuração e posição das marcas, ditas fiduciais, devem ser conhecidas com precisão micrométrica e não podem estar sujeitas a variação. Um filme flexível não é facilmente mantido em posição precisamente plana, exceto pela existência de uma superfície rígida e de um sistema pneumático que o mantenha contra ela. A distorção provocada pela passagem da luz ao atravessar o sistema de lentes deve ser muito pequena, e ainda, matematicamente passível de ser corrigida. E o tamanho da imagem registrada no filme (diretamente relacionada ao tamanho do próprio filme) deve ser tal que permita sua visualização em um sistema restituidor que possui fixa sua relação de aumento e permite a leitura dos objetos em escalas relacionadas à altura de vôo do levantamento.

Essas câmaras, ditas métricas, são estrategicamente tratadas e sua aquisição e operação, além de demandar alto investimento, exige autorização específica do Ministério da Defesa em duas instâncias: para realização do vôo e para a obtenção das imagens. Isso por serem considerados elementos de risco para segurança nacional quando utilizados de forma indiscriminada.

Tais observações possuem evidentes méritos. Entretanto, na sua realização, tem imposto certos empecilhos à operacionalidade dos sistemas aerofotogramétricos; tantos que sua aplicação no território nacional tem estado bastante limitada. Essa é uma análise concreta já executada inclusive internacionalmente por personalidades das geociências no Brasil, como pelo Dr. Gilberto Câmara do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais no relatório sobre a geoinformação no país enviada ao PROCIG (Central American Geographic Information Project, *site* da PROCIG, 2005).

Observe-se na Tabela 3 o resultado de uma análise preliminar executada sobre os dados do Cadastro de Levantamento Aeroespacial do Território Nacional (Site do CLATEN) para o Rio Grande do Sul:

TABELA 3. INVENTÁRIO DAS AUTORIZAÇÕES DE VÔOS SOBRE O RS

	RS
Aerolevantamentos nos últimos 25 anos	142
Número total de municípios sobrevoados	132
Aerolevantamentos nos últimos 5 anos	15
Número total de municípios sobrevoados	32
Número total de municípios no estado	497
Número de municípios com mais de 20000 habitantes em 2005	102
Número total de habitantes	10.845.087
Área total	281.748,54

Considerando todos os levantamentos realizados nos últimos 25 anos, em escala compatível com a cartografia cadastral em todo o estado, chega-se a um número médio de 6 levantamentos por ano. O total de municípios aerofotografados no período é de 132, menos de 30 % do total. Mesmo levando em conta somente os municípios com mais de 20000 habitantes o quadro é ainda pouco animador, dado que no estado são aproximadamente 100, ou seja, nos últimos 25 anos calcula-se uma média de pouco mais de um sobrevôo sobre esses principais municípios.

E cabe citar que a maior parte dos projetos abrangidos por esses sobrevôos visava projetos para construção de estradas, barragens, implantação de redes de transmissão de energia elétrica e torres de telefonia celular. Evidencia-se ainda, pois, que os valores registrados são muito inferiores a mais pessimista das expectativas e que não há esforço relevante em atualizar os cadastros municipais.

Note-se o fato de que a média se mantém nos últimos 5 anos, onde ocorreram tão somente 15 sobrevôos autorizados, sobre não mais de 32 municípios.

Há também o aspecto da redundância de levantamentos em regiões isoladas, não considerado nos valores das tabelas. Cerca de 20% do total de levantamentos foram executados sobre a região metropolitana de Porto Alegre, onde por vezes foram realizados mais de um levantamento no mesmo ano.

E esse quadro está assim estagnado, mesmo que nos últimos anos os municípios tenham sido incentivados a revisar ou implementar seus planos diretores, como já se disse, e há um prazo limite no corrente ano para que o façam, sob pena de sanções quanto à liberação de verbas federais do fundo de participação dos municípios e acesso a linhas de financiamento.

Finalmente, esses números devem ser analisados como regulares ou bons no cenário nacional. Na melhor situação da região nordeste são 42 levantamentos para o período de 25 anos no estado da Bahia. Ou seja, na média menos de dois por ano num estado que possui cerca de 160 municípios com mais de 20000 habitantes.

Essas observações podem não ser de todo conclusivas, mas indicam uma profunda subutilização de uma tecnologia consagrada e que muitos serviços poderiam estar prestando às administrações públicas. Hipóteses outras como a da realização de vôos clandestinos, associação não declaradas de vários municípios num mesmo projeto, não devem ser representativas. E também não há dados quaisquer que indiquem a ampla utilização de levantamentos cadastrais somente com uso de instrumentos topográficos e receptores GPS.

Quanto ao uso de imagens de satélites de alta resolução, embora ainda não estejam em condições de produzir resultados dentro da especificação legal, dada sua resolução espacial, uma breve consulta aos acervos dos produtos IKONOS e QuickBird disponíveis nos respectivos representantes comerciais no Brasil demonstra que a cobertura do território nacional tem aumentado, embora ainda seja muito pequena.

Uma afirmação, no entanto, pode ser feita com base nos fatos analisados: o número de levantamentos aerofotogramétricos em grande escala está muito aquém do esperado considerando que tal é a melhor alternativa técnica. Neste contexto algumas questões podem ser colocadas: não haveria demanda para esses serviços? Não haveria oferta para esses serviços? Ou estariam os preços praticados fora da realidade dos orçamentos públicos e privados?

Com relação à questão dos valores envolvidos nos projetos aerofotogramétricos existem famosas discussões no Brasil. Textos como “São caros os serviços de aerolevantamento?” (Alves, 2003) apresentam argumentos que contrapõe a assertiva de altos preços para o serviço como função dos benefícios auferidos com o produto final. No entanto, haveria outro motivo, mais importante que a alta carga orçamentária, para que a maioria das administrações públicas não mantenha seus cadastros atualizados com o uso dessa tecnologia? Ainda, considerando como certo o aumento da arrecadação advindo das atualizações cadastrais, como se justifica que esses investimentos sejam evitados?

Analisar se um determinado serviço possui preço excessivamente alto ou não é tarefa permeada de subjetividade. No entanto, observe-se a seguinte investigação: três empresas consagradas e operando no território nacional foram consultadas a fim de se obter orçamentos para um determinado serviço fotogramétrico, a ser executado para uma terceira empresa, em uma região distante não mais de uma hora de voo de suas sedes. A área total dos projetos seria de aproximadamente 10 km², a ser coberta num plano simples de três faixas, numa escala 1:8000. Foram cotados ainda os serviços de apoio, aerotriangulação, restituição e ortorretificação. A Tabela 4 apresenta os preços fornecidos.

O valor médio para realização do serviço, como se vê, situa-se entre 20000 e 25000 reais por km². O produto resultante estaria muito próximo do ideal para composição do cadastro de uma pequena/média área urbana de um município: um conjunto de imagens digitais ortorretificadas, restituição planimétrica ao nível de lotes, altimetria na forma de um MDT (Modelo Numérico Digital do Terreno).

Uma área de 10 km² ocupada segundo a densidade populacional média dos pequenos municípios do Rio Grande do Sul (por exemplo) corresponderia a uma cidade com cerca de 30000 habitantes.

TABELA 4. ORÇAMENTOS APRESENTADOS POR TRÊS EMPRESAS PARA UM SERVIÇO DE AEROLEVANTAMENTO E CARTOGRAFIA DE UMA ÁREA DE 10Km²

	Cobertura aerofotog	Apoio GPS	Aerotri	Restituição Digital	Ortofotos	Total
Empresa A	62000,00	24000,00	4500,00	109500,00	55000,00	255000,00
Empresa B	28000,00	10500,00	3200,00	125000,00	25000,00	191700,00
Empresa C	35000,00	22000,00	3000,00	96000,00	35000,00	191000,00

A título de exemplo será tomado o município de Jaguarão, na fronteira sul, com 31500 habitantes. Sua receita corrente anual é de aproximados 15 milhões de reais. Desses, 8 milhões são consumido com folha de pagamento do funcionalismo e outros 5 milhões com despesas correntes de aplicação direta (como consumo e manutenção da máquina pública e pagamento de aposentados). No último ano, o total orçado para investimento não montava 750 mil reais.

Então, o valor orçado para o serviço de levantamento (somente da área urbana do município) corresponderia a um terço do total para investimentos dessa prefeitura. Esse é um quadro que se repete na maioria dos municípios do estado.

Do ponto de vista do executor, tal serviço equivale a um vôo de no máximo duas horas, contados diretamente os tempos de deslocamento entre o hangar e a área de interesse, visto não haver necessidade de uma base de operações afastada da sede da empresa. Mesmo por segurança, prevendo a necessidade de duas tentativas e uma aeronave que consuma 100 litros de combustível por hora, é impossível pensar num consumo de mais de 400 litros, o que hoje representaria menos de R\$ 2000,00.

Nas planilhas de custos da operação de aerofotogrametria devem constar além do combustível, parcelas referentes a recursos humanos, aeronave e câmara. São, pois, valores referentes a salários de piloto e fotógrafo, taxas de mobilização e desmobilização desse pessoal, seguros anuais e taxas para habilitação dessa tripulação. Taxas de hangar, revisão e depreciação da aeronave, além da comum taxa de ociosidade da mesma.

Ainda, depreciação da câmara e, talvez, algum valor referente a sua calibração. Esses valores são comumente proporcionais ao custo do combustível e normalmente não o ultrapassam. Para meros efeitos de análise preliminar podemos considerar esses valores equivalentes ao já citado.

Finalmente, o filme e os serviços derivados que resultam num conjunto de imagens digitais e num foto-índice a ser entregue ao cliente. Seriam tão somente 27 fotos coloridas obtidas a uma altura de voo de 1200 m. Se a empresa cotar o preço de um filme inteiro (por exemplo, um rolo de filme Kodak color 250ft ARCLR III 2444, com 62,5 m) embora somente 10% do rolo seja necessário, são aproximadamente R\$ 5000,00. Revelação, normografia, cópias coloridas em papel, plano de voo e foto índice consumiriam mais R\$ 3000,00. A taxa de autorização do voo junto ao Ministério da Defesa não custa mais do que R\$ 500,00. Efetuar a digitalização de 27 fotos consome cerca de 8 horas de serviço de scanner e gravação em mídia óptica e não deve valer mais do que R\$ 1500,00. Então o custo total para obter as imagens aerofotográficas chega a R\$ 14.000,00. Onde os valores cotados representam pelo menos o dobro desse custo.

Em relação ao apoio deveria ser realizado o rastreamento GPS de cerca de 15 pontos de controle, mais uns 5 de verificação. Mesmo prevista a monumentalização de alguns marcos geodésicos na área de levantamento o valor de R\$ 1000,00 por ponto é extremamente alto. E essa análise poderia ser estendida aos demais itens cotados e não seria diferente o resultado.

Um outro aspecto que se sobressai é a grande discrepância de valores, onde o preço de uma empresa supera o dobro da outra em muitos dos serviços, indicando sistemática de composição dos orçamentos difíceis de serem justificadas.

Outros importantes argumentos poderiam ser apresentados em torno desses dados, porém, resta aqui observar que o custo por metro quadrado, somente considerado o serviço de levantamento aerofotogramétrico, está na ordem de grandeza de dez vezes o mesmo custo de uma imagem orbital de alta resolução, considerados todos os privilégios possíveis na sua aquisição.

Se for levado em conta imagens de catálogos das empresas que representam no Brasil as dominantes Digital Globe© e Space Imaging© essa comparação chega a atingir valores até cem vezes maior!

Assim, fica a questão: os valores cotados estão dentro da realidade de que tipo de mercado?

Embora tenha sido um fato peculiar, corrobora praticamente os argumentos apresentados o ocorrido no Paraná em 2003, estado sede de muitas das principais empresas de aerofotogrametria e cartografia do país: o governo do estado instigado e sustentado pelo Ministério Público do Estado do Paraná anulou contrato com um consórcio dessas empresas que previa a realização de levantamentos sobre diversos municípios. Da sumula do ato destaca-se:

... consideram-se, através desse instrumento, nulos contratos ou partes deles, firmados anteriormente e **todos lesivos ao patrimônio público**.
... são completamente anulados os contratos da Paranaidade com empresas de aerofotogrametria, no valor de R\$ 6,2 milhões ...

Houvesse maior e ética concorrência, possibilidades tecnológicas ampliadas, uma legislação mais adequada, serviços expeditos e os valores ainda seriam os atualmente praticados? Tendo em vista o quadro de obsolescência da cartografia cadastral nacional e seu papel estratégico no desenvolvimento do país já não é tempo de se rever as políticas públicas que cartorizaram (e por consequência, cartelizaram) esses serviços?

Não é o tema central da pesquisa efetuar uma análise profunda dessa questão, mas antes, com base nesse quadro, apresentar uma concreta justificativa para investimentos na pesquisa fotogramétrica, especialmente em relação a alternativas para torná-la mais viável dentro da realidade das administrações dos municípios brasileiros. No texto ora apresentado serão abordados, especificamente, o uso de câmaras de baixo custo e a automação da detecção de mudanças na cartografia com base nas imagens obtidas com tais dispositivos.

2.3. Aerofotogrametria com uso de câmaras digitais de baixo custo

O uso de câmaras de pequeno formato em levantamentos aerofotogramétricos é tema de pesquisa há muitos anos. São assim conhecidos esses dispositivos, no universo da Fotogrametria, em função do tamanho das lentes, da distância focal, do filme (ou atualmente do sensor), do corpo da câmara, todos serem proporcionalmente pequenos em relação aos das câmaras métricas. Até pouco tempo eram considerados totalmente não recomendados para execução de trabalhos com objetivo cartográfico, especialmente devido ao tamanho do filme, às distorções a que fica sujeito, à falta de marcas fiduciais, à qualidade das lentes e à baixa estabilidade do conjunto. Ainda assim, eram apresentados como alternativas naquelas situações onde a aplicação da fotogrametria convencional torna-se inviável, função de seu custo ou de sua indisponibilidade.

No Brasil são mais de 15 anos de referências a aplicação dessas câmaras, como em Amorin (1989), Disperati (1991), Barbosa (1992), Gallo (1993), Amorin (1993), Schumacher (1995), Lima et al (1998), Santos (2000), Mitishita et al (2001) Rezende Filho (2001), Hartmann (2002), Barbosa (2003), Habib (2003), Machado (2003), entre outros.

Estender o campo de busca para referências internacionais traz ainda maiores perspectivas. Como exemplo cabe citar o fato de uma das mais conceituadas revistas da área de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, a *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, somente no último ano, apresentar quatro artigos sobre câmaras de pequeno formato: Li (2005), Mostafa (2005), Habib (2005) e Tommaselli (2005).

Uma fundamental mudança ocorreu no decurso dessa história na última década e deve ser detalhadamente analisada: a substituição dos filmes fotográficos por um sensor semicondutor. Os mais utilizados atualmente são o CCD (*charge coupled device*, dispositivo acumulador de carga) e o CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*, i.e.,

semicondutor metal-óxido complementar), mas já chegam ao mercado os JFET (Junction Field Effect Transistor, i.e., transistores de efeito de campo em junções), a próxima geração. Todos registram eletronicamente a imagem e a armazenam em meio digital. O CCD ainda é o sistema mais usual, mas vem sendo sistematicamente substituído pelos CMOS.

Embora os sensores sejam basicamente compostos de um arranjo bidimensional de pequenas células semicondutoras há diferenças substanciais entre eles. O CCD possui um sistema seqüencial de leitura da informação, todo distribuído em suas bordas exigindo o uso de um processo de varredura. Isso faz com que seja mais lenta a composição da imagem final e maior o tempo de letargia do sistema entre duas tomadas. Seu consumo de energia é maior e sua manufatura bem mais complexa, o que eleva o preço para o consumidor final.

O CMOS efetua a conversão fóton-elétron e elétron-voltagem diretamente em cada célula sensorial, simultaneamente, sendo, pois, bem mais rápida a transferência das cargas acumuladas para o conversor analógico-digital, sistema que em última instância gera a imagem. O processo industrial utilizado em sua fabricação é o mesmo das memórias de acesso randômico e dos microprocessadores dos computadores e, por isso, de custo mais baixo, além de permitir a integração direta no próprio sensor de circuitos para efetuar operações de processamento de imagem. Tais sistemas são conhecidos em linguagem eletrônica como APS (*active pixel sensor*, sensores de píxel ativo). Os sistemas JFET são APS como os CMOS, porém construídos sobre transistores de efeito de campo para se obter melhor ganho do sensor, permitindo obtenção de imagens mais nítidas inclusive sob condições não favoráveis de iluminação.

Todos esses sensores possuem suficiente rigidez e estabilidade dimensional para aplicações fotogramétricas. Além disso, uma vez que a imagem é diretamente gerada em ambiente eletrônico analógico/digital, é facilitado seu processamento na aplicação de modelos para devida correção geométrica e radiométrica, aproveitando-se, assim, ao máximo a resolução espacial da mesma.

Por essa razão a realidade hoje difere substancialmente daquela apresentada justificadamente por Lima (1998), onde um quadro pouco promissor para aplicação de câmaras de pequeno formato era descrito e condenado seu uso cartográfico. Os argumentos apresentados então, baseados na teoria da fotogrametria convencional, indicavam a baixa qualidade e ineficácia dos produtos que podem ser extraídos desse tipo de imagem e hoje devem ser revistos.

As principais restrições apresentadas eram:

- baixa qualidade das lentes, produzindo grandes distorções;
- pouca estabilidade do sensor onde a imagem é originalmente formada, donde cada tomada poderia diferir da anterior criticamente;
- distância focal muito pequena, incompatível com a geração de cartas em grande escala;
- imagens com pequena abrangência, ou seja, cobrindo pequenas áreas do terreno, exigindo grande número de imagens, cujo tempo de processamento inviabilizaria seu uso prático em áreas maiores do que alguns quilômetros quadrados.

Pois bem, a qualidade das lentes disponíveis hoje em câmaras para aplicações profissionais do mundo comercial corrente da fotografia (utilizadas em fotos artísticas e na grande imprensa esportiva, de moda, de turismo, científica e cotidiana) tem sido submetida à prova em processos de calibração e os resultados apontam no sentido de boa qualidade geométrica. Além disso, os próprios modelos de calibração têm evoluído de forma a contemplar a presença de erros sistemáticos de maior relevância nesse tipo de lente, conforme abordado em capítulo próximo.

Quanto à estabilidade do sistema óptico-sensor dessas câmaras, também não se tem encontrado resultados críticos, considerando séries históricas de calibração e tendo em vista que tais dispositivos, evidentemente, quando destinados à aplicação fotogramétrica deverão ser manuseados e armazenados com cuidado. Há sim indicação de que câmaras com lentes zoom (distância focal variável) e intercambiáveis (permitem a troca de lentes) devem ter tais funções desabilitadas, ou, caso utilize-se

desses recursos, após cada operação um processo de calibração deve ser executado. Fato é que o procedimento para calibrar câmaras através de diversos campos de calibração e do método das fotos convergentes é passível de ser utilizado rapidamente e sem grandes investimentos, o que permite recomendar a calibração antes de todo levantamento de maior porte para garantia da sua qualidade.

A questão que envolve a distância focal e sua relação com a resolução deve ser analisada física e matematicamente, pois dela resulta um importante veredicto acerca do uso das imagens geradas pelas câmaras digitais para levantamentos aerofotogramétricos. Deve-se atentar para o fato de a resolução espacial também estar intimamente relacionada à qualidade geométrica e radiométrica das imagens.

Na sua definição mais restrita, poder de resolução (Jensen, 1996) refere-se a uma qualidade espacial da imagem, ou seja, a condição que uma imagem dá ao fotointerprete de, inequivocamente, identificar dois alvos separados no terreno por uma certa distância como dois objetos distintos. A essa mínima distância denomina-se resolução da imagem.

Numa definição menos formal, mais corrente nos dias de hoje, principalmente na linguagem de quem trabalha com sensoriamento remoto, o termo resolução espacial é tomado diretamente como a distância amostral medida sobre o terreno (na literatura internacional, GSD, *ground sample distance*). Em outras palavras, projetando-se a área de cada célula do sensor, através do sistema óptico da câmara, até o plano do solo e computando-se a média das dimensões dessa figura poligonal.

Esse é tido como o mais importante fator para avaliação da utilidade de uma imagem para fins cartográficos. Esse parâmetro está para a fotogrametria digital como a escala da foto (calculada como a razão entre a distância focal e a altura de vôo) para a fotogrametria convencional. Pode-se calcular a GSD como:

$$GSD = \left(\frac{H}{f} \right) \cdot p \quad (1)$$

onde H é a altura de vôo, f a distância focal da câmara e p as dimensões físicas do píxel no sensor CCD.

Considere-se os seguintes exemplos. A câmara KODAK DSC-460 possui um píxel de $9\text{ }\mu\text{m}$ e distância focal de 21 mm . Para se obter uma imagem com GSD de 25 cm é necessário voar a uma altura de 780 m . Se os mesmos cálculos forem executados para uma câmara de menor porte, como a SONY DCS-P50, onde $p = 3,3\text{ }\mu\text{m}$ e $f = 6,5\text{ mm}$, a altura H valerá 490 m . Para a SONY DCS F-828, $p = 2,7\text{ }\mu\text{m}$ e $f = 10,0\text{ mm}$, a uma altura de 925 m , se obterá uma GSD próxima aos exigidos 25 cm .

Analisando os resultados fica evidente que, para o objetivo proposto, câmaras como a DSC-460 e a F-828 podem produzir bons resultados com uso de aeronaves de pequeno porte. E com o advento de câmaras dotadas de sensores CMOS ou JFET, com maior resolução, sistemas de lentes mais avançados e disponíveis no mercado em boas condições de preço, resultados ainda mais promissores serão auferidos.

Uma imagem resultante da amostragem do terreno em células de $25\times 25\text{ cm}$ pode ser restituída digitalmente para um produto cuja precisão posicional esteja na faixa de 50 cm , ou seja, compatível com a PEC classe A para cartas escala $1:2.000$. Ao mesmo tempo não se pode ignorar que a relação entre a distância focal e a altura de vôo resulta para a câmara F-828 numa escala de vôo de aproximadamente $1:100.000$. O aparente paradoxo, no entanto, resolve-se facilmente na medida em que se observa a discretização do espaço objeto no espaço imagem no meio digital. O espaço imagem discreto pode ser ampliado a um nível onde sua menor célula possa ser visualizada e a decisão do ponto de interesse recai, então, sobre a escolha de uma pequena área identificável onde o mesmo provavelmente se encontra. No ambiente analógico da fotogrametria convencional, mesmo aquela dos restituídores analíticos, há a restrição da óptica do sistema estereoscópico e uma imagem em diapositivo obtida nessa escala de vôo poderia no máximo ser restituída para uma carta $1:25.000$.

Essa vantagem dos sistemas digitais é fartamente explorada há anos nas estações de trabalho fotogramétricas e já se investiga a possibilidade de que diapositivos digitalizados por *scanners* fotogramétricos possam servir de base para restituições em escalas maiores no meio digital do que o seriam nos sistemas ópticos convencionais (Preoski, 2006).

Somente a alta resolução espacial não define totalmente a condição de medir com precisão os objetos na imagem. É fundamental que a qualidade óptica e radiométrica da imagem sejam ótimas. Avaliar essa condição não é um tema trivial. Light (2004) apresenta um critério quantitativo para uma análise inicial bastante interessante, considerando a função de projeto dos sensores de imagem. Essa função está baseada na área do círculo de Airy, comumente utilizado para medir o poder de resolução de sistemas ópticos de acordo com o critério de Rayleigh (Schott, 1997).

O círculo de Airy representa a melhor modelagem para o efeito de difração da luz ao atravessar uma abertura circular. O diâmetro do círculo de Airy, no plano focal da câmara, fisicamente representa a área onde há a maior concentração de energia da onda luminosa sobre o sensor e pode ser determinado, segundo Schott (1997) e Holst (1999), por:

$$d = 2,44\lambda F \quad (2)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz e F o “número F” da lente da câmara (também comumente designado como f-stop ou velocidade da lente) calculado como a razão f/D , sendo f a distância focal da lente e D o diâmetro de abertura do diafragma.

A condição de resolução de um objeto na imagem passa pela sua discretização em pontos cuja área seja menor que o círculo de Airy. Melhor, a área do círculo deve conter no mínimo 2 píxeis, uma vez que se aplique o critério de amostragem de Nyquist. Assim, no mínimo, $d = 2p$. Levado na equação 3 e algebricamente operado resulta:

$$DP = \frac{\lambda F}{p} = 0,82 \quad (3)$$

DP é o chamado parâmetro de projeto dos sensores e o valor 0,82 é considerado o valor mínimo para que a condição de Rayleigh seja obedecida. Light (2004) aplicou a formulação para o caso dos sensores orbitais IKONOS e QUICKBIRD. A abertura nesse caso corresponde ao diâmetro do espelho primário do sensor. O comprimento de onda foi considerado como o do meio do intervalo espectral dos sensores, 0,675 μm . Para o IKONOS o parâmetro de projeto fica em torno de 0,81 e para o QUICKBIRD aproximadamente 0,82. Ou seja, essa provavelmente foi a função de projeto utilizada em ambos os sensores.

Cabe aplicar a formulação para algumas câmaras disponíveis para utilização nesse estudo, como a DSC-460 e a F-828. Nesse caso, no entanto, pode ser mais útil fixar DP em 0,82 e λ no comprimento de onda central do espectro visível, ou seja, 0,55 μm . A variável p é a dimensão física do píxel no CCD, também conhecida. Resta incógnito o valor de F , cujo cálculo permitirá determinar a configuração ótima distância focal / abertura da câmara.

Assim para DSC-460 resulta F igual a 13,4 e para F-828 igual a 4,02. Esses parâmetros podem ser usados para definir a configuração do sistema de lentes, basicamente, ajustes de distância focal (lentes com zoom), abertura do diafragma e tempo de obturação.

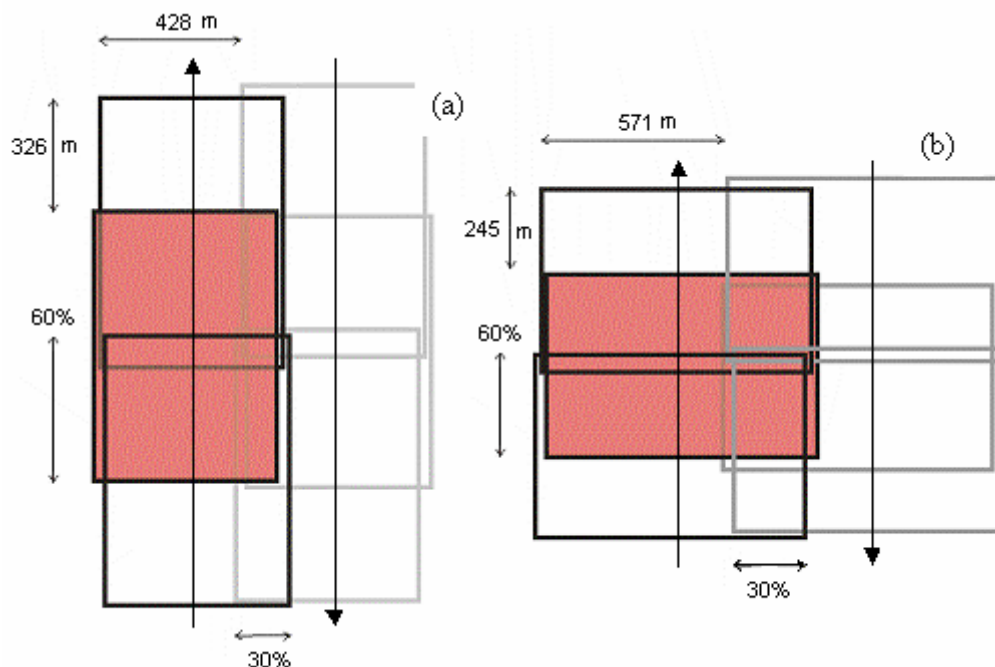
As câmeras fotográficas digitais disponíveis no mercado para aplicações ordinárias, nesse estudo fonte de dados para uso cartográfico, possuem funções avançadas diversas para facilitar e automatizar a captura de cenas por parte de seus usuários. A maioria dessas funções avançadas não estão presentes nos dispositivos fotogramétricos analógicos em função de características próprias do seu uso e da maior estabilidade mecânico-óptica necessárias naqueles sistemas. Assim, é fundamental atentar para configuração das câmaras digitais antes de executar qualquer expedição fotogramétrica, não só para que os fatores de projeto acima citados sejam obtidos, mas para que a funcionalidade óptico-sensorial da câmara seja aproveitada ao máximo. E não são poucas as opções de configuração disponíveis.

O anexo 1 apresenta um resumo do conjunto de providências a serem tomadas com a SONY F-828, a título de exemplo. Para outros modelos de câmara poderão ocorrer algumas diferenças, porém, a essência dos procedimentos pode ser baseada no exemplo apresentado.

Concluindo a análise dos aparentes inconvenientes das câmaras digitais de pequeno formato constata-se: o número de imagens isoladas obtidas num levantamento com tais câmaras realmente será muito maior que aquele resultante de um levantamento com câmara convencional.

O CCD da F-828 possui cerca de 8 Mpíxeis, distribuídos em 2448 linhas de 3264 células cada. Tendo em conta parâmetro já utilizado anteriormente, GSD = 25 cm, cada cena abrange, sobre o terreno, uma área de 612 x 816 m. A figura 4 mostra os dois arranjos possíveis para o voo segundo essa configuração, com a maior dimensão da área de cobertura posicionada na direção de voo ou perpendicular a essa direção.

FIGURA 4. ALTERNATIVAS PARA RECOBRIMENTO AEROFOTOGRAFICO



É evidente que o intervalo de tempo entre duas fotos consecutivas, caso o terreno seja plano, depende somente dessa configuração geométrica e

da velocidade do avião. Considerando que a mínima velocidade que uma aeronave de pequeno porte pode manter a essa altitude é de cerca de 150 km/h, no caso da configuração “a” o intervalador deverá ser programado para algo como 8 s e da “b” em 5 s. Esse tempo é, pois, um outro fator importante para o projeto, podendo tornar-se crítico em função do tempo de inatividade de algumas câmaras entre duas fotos consecutivas, tempo esse consumido no processamento de baixo nível e no armazenamento das imagens.

A partir dos cálculos apresentados é fácil perceber que, em geral, para se cobrir grandes áreas, serão necessárias muitas linhas de voo, bastante próximas uma das outras, e um grande número de imagens por linha de voo. Esse é um fator crítico em relação à autonomia de armazenamento das imagens e em relação ao processamento das mesmas a posteriori.

Em alguns casos, quanto não houver necessidade de extração da coordenada z dos pontos das imagens, pode-se negligenciar o recobrimento longitudinal de 60% apresentado na figura 5. Com isso, obviamente, o número de imagens por faixa diminui drasticamente. Porém, para o estudo aqui desenvolvido determinar a altitude dos pontos é um fator muito importante, donde os vôos que subsidiam dados para esse fim foram planejados com tal propriedade.

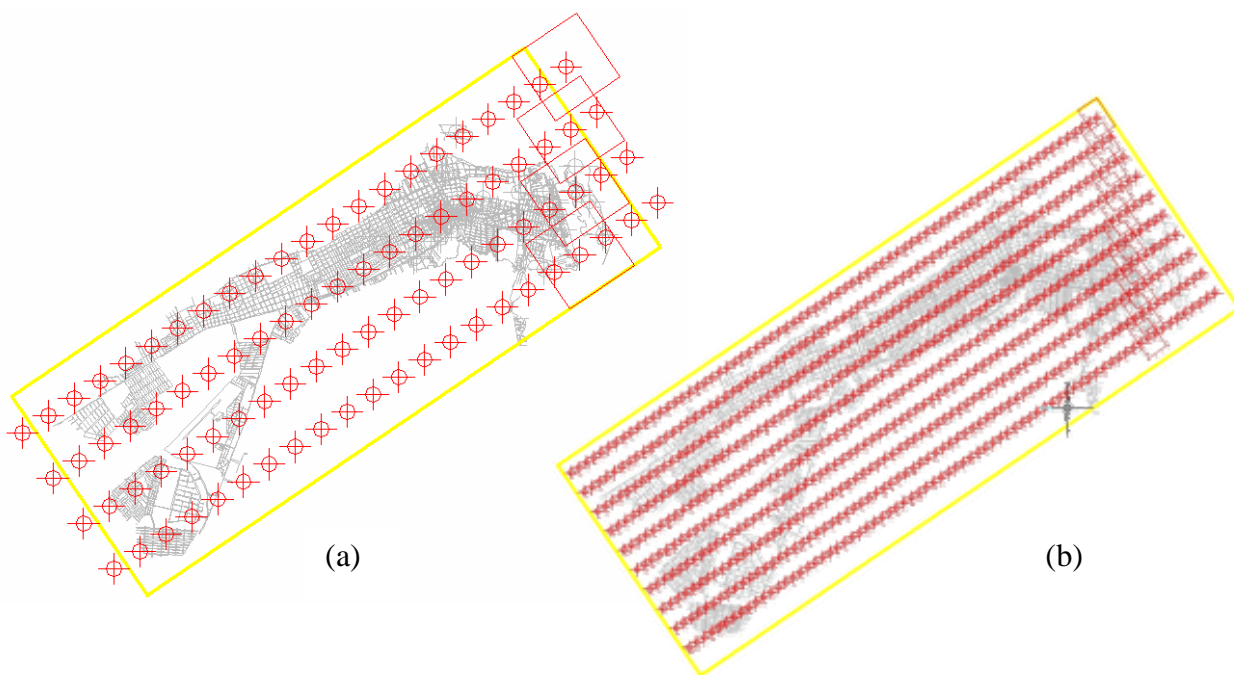
Observe-se o seguinte problema: efetuar um plano de voo para cobertura da área urbana do município de Rio Grande, no estado do RS. A figura 5 mostra um esboço dessa área, com os bairros da cidade em cinza, os limites do levantamento numa linha amarela e os centros das fotos do plano de voo com pontos vermelhos. A área total atinge 83.3 km², contida num retângulo de 14,6 x 5,7 km. Considerando uma câmara métrica, obtendo imagens sobre um filme de 23x23cm em escala 1:8000 (para restituição 1:2000), seriam necessárias 88 imagens no bloco aerofotogramétrico figura 5 (a).

Considerando uma câmara digital KODAK DCS460 utilizada em um voo para uma taxa de amostragem de 25 cm no terreno (a 800 m de altitude) equivalente a anterior restituição 1:2000, seriam 720 imagens, cada uma

cobrindo uma área do terreno aproximadamente retangular de 750 x 500 m, *vide* figura 5(b). Como a área de cada imagem é relativamente pequena é possível descontar aquelas que cobrem regiões onde nenhuma feição é de interesse. No exemplo, se o interesse é somente a área urbana, cerca de 180 imagens podem ser retiradas do bloco, resultando 540 imagens. Ainda assim um grande número de imagens.

Porém, há que se apreciar o desempenho dos sistemas fotogramétricos digitais hoje disponíveis, com ferramentas de alta produtividade para seleção de pontos fotogramétricos (pontos de ligação entre as imagens de uma mesma linha e entre linhas), valendo-se da condição de correlação espacial para determinação de pontos homólogos, ferramentas de detecção de erros grosseiros, interfaces inteligentes e ergonômicas. Ainda, o avanço das técnicas de posicionamento GPS, que permitem a efetiva coleta de pontos de controle para orientação exterior e fazem com que também essa condição de maior número de pontos de controle não seja demais restritiva para formação de grandes blocos.

FIGURA 5. CONFIGURAÇÃO APROXIMADA DE UM PLANO DE VÔO AEROFOTOGRAMÉTRICO SOBRE RIO GRANDE – RS. (A) CÂMARA MÉTRICA (B) CÂMARA DIGITAL DE PEQUENO FORMATO.

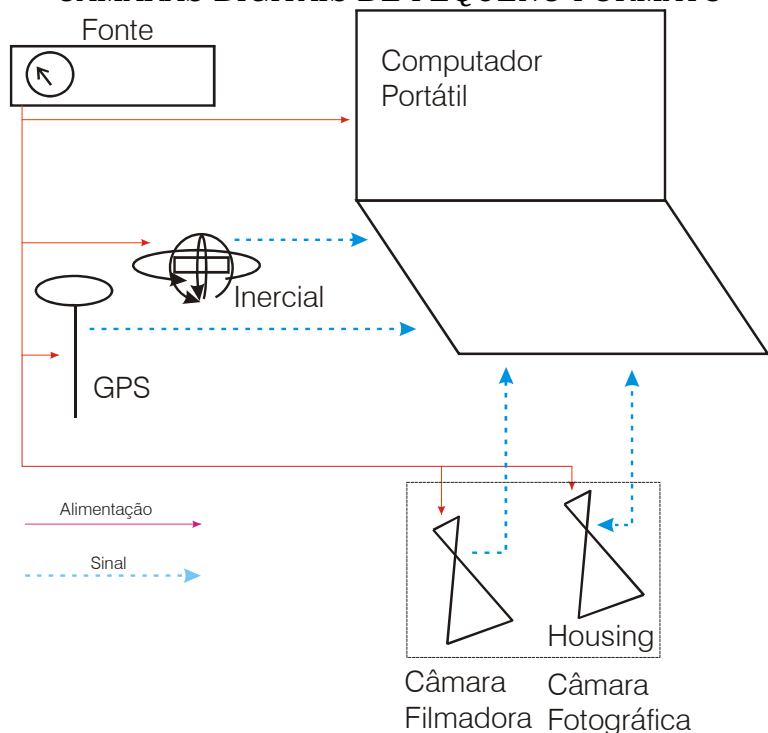


Com o raciocínio acima desenvolvido busca-se consolidar a posição de viabilidade na utilização de câmaras digitais de pequeno formato nesse tipo de levantamento e justificar a intensa utilização dos dados por elas gerados nesse trabalho.

2.4. Um sistema aerofotogramétrico de Baixo Custo

A figura 6 apresenta o diagrama esquemático da implementação física de um sistema que permite efetuar levantamentos com qualidade e produtividade baseado em câmaras digitais. Já existem alguns modelos comerciais similares na Austrália, no Canadá e nos Estados Unidos da América. Um destes, comercializado pela empresa norte americana POSITIVE SYSTEMS foi lançado ainda em 1997: o sistema ADAR, Airborne Data Acquisition and Registration.

FIGURA 6. ESQUEMA DE UM SISTEMA DE AEROFOTOGRAMETRIA BASEADO EM CÂMARAS DIGITAIS DE PEQUENO FORMATO



Oportunizado por um convênio com a Prefeitura Municipal do Rio Grande, RS, a Fundação Universidade Federal do Rio Grande veio a adquirir, em 1998, um desses dispositivos, o ADAR 1000, cujo número de série 7 indicava já terem sido colocados em operação, à época, seis dos mesmos modelos. A base operacional do modelo é uma câmara digital KODAK DSC 460. Trata-se de uma câmara híbrida onde um sistema CCD de 6 Mpíxeis está adaptado no corpo e sistema óptico de uma NIKON F90. O posicionamento e navegação são feitos por um DGPS Novatel, com link por rádio. O *housing* que comporta as câmaras é uma estrutura de alumínio com um rústico sistema mecânico de compensação de atitude. Não há um sistema inercial que registre atitude do sensor. O valor total do investimento foi então de US\$ 50.000,00.

Seis anos depois, dada a melhoria da qualidade das câmaras e a significativa redução nos valores de mercado dos equipamentos que compõem um sistema desse tipo, torna-se viável construí-lo sob nova base tecnológica, com capacidade operacional bastante evoluída e custo bem mais baixo.

Hoje, ao custo de US\$ 3.000,00 é possível adquirir um dispositivo fotográfico digital de 16 Mpíxeis com tecnologia CMOS e ótimas lentes. Câmaras capazes de coletar uma imagem em formato bruto (sinal original do sensor totalmente preservado) e transferi-la para uma placa de memória permanente com capacidade de armazenamento de mais de 2 Gb a uma taxa de 64 Mbps. Ou seja, pode-se pensar em tomar imagens consecutivas a cada 5 ou 6 s.

Tais câmaras ainda permitem a aquisição de imagem na faixa do infravermelho próximo, bastando para tal o uso de um filtro de radiação passa faixa instalado na abertura de sua objetiva.

Um protótipo simples pode ser construído tendo como base uma câmara Sony DCS F-828, ou uma KODAK DSC FV, com vantagens para essa última que aceita protocolo de comunicação serial diretamente do sistema computacional. A figura 7 apresenta uma vista explodida da câmara Sony DCS F-828 e suas principais características estão na tabela 5.

FIGURA 7. VISTA EXPLODIDA DA CÂMARA SONY F-828 (SONY CORP., 2003)



TABELA 5. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DA CÂMARA SONY F-828

Material	Liga de Magnésio
Píxeis efetivos no CCD	8.0 milhões
Tamanho do CCD	2/3" (8.8 x 6.6 mm)
Tamanho do Píxel	2.7 μ m
Conversor A/D	14 bits
Processador	Sony "Real Image Processor"
Tamanho das Imagens	• 8M: 3264 x 2448 • 3:2: 3264 x 2176 • 5M: 2592 x 1944 • 3M: 2048 x 1536 • 1M: 1280 x 960 • VGA: 640 x 480
Formato das Imagens	• RAW • TIFF • JPEG (EXIF 2.2) - Fine, Standard
Lentes	• 7x zoom óptico • Carl Zeiss T*
Zoom equivalente	28 mm a 200 mm (7x)
Sensitividade	• ISO 64 – 200
Aberturas	• Wide: F2.0 a F8.0 • Tele: F2.8 a F8.0
Tempo de obturação	30 a 1/2000 segundos
Compensação Exposição	de -2eV to +2eV em intervalos de 1/3eV
Armazenamento	• Memory Stick e Memory Stick Pro • Compact Flash Type I/II) • IBM Microdrive
LCD	• 1.8" TFT LCD • 134,000 píxeis
Alimentação	• Baterias Lithium-Ion InfoLithium NP-FM50
Peso com bateria	906 g
Dimensões	134 x 91 x 156 mm

O esquema das operações necessárias para essa realização posicional segue a ordem abaixo descrita:

- implantar uma estação de referência próxima à área do levantamento. Essa operação deve ser efetuada através de um posicionamento estático em relação a um marco geodésico próximo ou em relação a algum ponto da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), quando disponível.

- durante o período do voo um receptor deve ser mantido monitorando a posição da estação de referência, registrando dados a uma taxa de 1Hz.

- a bordo da aeronave um receptor será mantido recebendo dados no modo cinemático, continuamente, a cada 1s e sob demanda do sistema de controle da câmara.

- o ajustamento das posições coletadas deve ser efetuado num sistema de pós-processamento. Será obtida uma resposta bastante precisa para a totalidade da trajetória da plataforma na taxa de 1 Hz, ou seja, uma coordenada por segundo.

Se o relógio da câmara estiver sincronizado com o tempo GPS serão conhecidas com boa precisão as posições no instante da tomada de cada fotografia, suficiente para alimentar valores iniciais do centro de projeção do sistema fotogramétrico no processo de ajustamento.

Se utilizado um par de instrumentos que recebem somente a portadora GPS L1 será possível determinar as posições da plataforma com precisão sub-métrica, considerando que o ponto de referência no terreno não diste mais de 10 km da posição de tomada mais extrema. Essa informação confere com Mônico (2000).

Um conjunto de receptores e antenas com especificação que satisfaz o uso acima previsto tem seu valor de mercado situado entre US\$ 10.000,00 e US\$ 12.000,00.

O controle geral dos dispositivos deve ficar centralizado em um microcomputador portátil, uma plataforma de alta performance, passível atualmente de operar com ciclo de 2 GHz. A arquitetura dessa plataforma deve possuir um mínimo de 4 portas de comunicação, síncronas e de alta

velocidade, como as do padrão USB. Um sistema operacional multi-tarefa, compartilhado, executando software especialista, coloca-se em condições de manter operacionais as seguintes tarefas:

- sincronizar o relógio do computador com o relógio do sistema GPS;
- fazer as funções de um intervalômetro digital;
- controlar todas as funções da câmara;
- monitorar o uso da memória da câmara;
- enviar mensagens para o receptor GPS, coletar seus dados e exibi-los em tempo real permitindo acompanhar o plano de vôo;
- receber e exibir, em tempo real, a imagem da câmara filmadora de monitoramento da área sob os instrumentos no terreno;

Das funções descritas uma das mais importantes é a de intervalômetro. Basicamente consiste em utilizar o gerador de pulsos do processador da máquina para contar precisamente o tempo entre duas tomadas da câmara. Um exemplo de código em C++ para executar essa função é apresentado no anexo 2.

Completam a especificação de um sistema desse tipo:

- uma câmara filmadora, instalada de forma a manter sua área de visada sobre o terreno similar a da câmara fotográfica, permitindo controle visual do levantamento em tempo real;
- uma fonte regulada de tensão, que permite alimentar todos os instrumentos a bordo sem a necessidade de considerar a autonomia das baterias de cada um deles.
- uma estrutura (caixa metálica adaptada) para sustentar e proteger fisicamente as câmaras, permitindo seu fácil acoplamento às aeronaves, quer seja na espera das câmaras aerofotogramétrica (nas plataformas especialmente adaptadas a essa finalidade) ou diretamente acoplada nas asas ou no dorso da aeronave.

Construir um sistema desse porte, configuração considerada ótima, demanda hoje, no Brasil, um investimento da ordem de R\$ 45.000,00. Considerando a disponibilidade de um software que agilize o processamento das imagens e o reconhecimento semi-automático das feições cartográficas, pode-se prever que o custo final de um produto restituído com essa tecnologia viabilize a atualização de informações de muitas áreas críticas no país.

O software de controle do sistema fotográfico digital para levantamentos aéreos pode ser codificado em qualquer linguagem de alto nível e alto desempenho, como Delphy, C++, Java. Essas linguagens permitem a construção de estruturas complexas, classes e objetos, interface gráfica e isso sem perder o acesso aos elementos mais importantes do baixo nível de programação, como acesso direto a memória, controle das portas e a possibilidade de codificar partes do programa em linguagem de máquina, quando o tempo de processamento de algum segmento do código torna-se crítico.

Ainda em relação às questões lógicas, dois principais protocolos devem ser considerados:

- Protocolo de controle da câmara digital. Esse protocolo permite que comandos de controle geral sejam enviados desde a plataforma computacional diretamente à câmara. O principal comando a ser considerado é, evidentemente, o acionamento do obturador, embora operações como a transferência das imagens desde a memória residente na câmara para a do computador possa também ser altamente desejável. Em geral, os códigos são enviados via cabo serial, em palavras compactas de até 4 bytes.

Abaixo um exemplo das principais seqüências para câmaras que seguem o protocolo MC-EU1, utilizados em muitos modelos de câmaras.

A velocidade da conexão serial deve ser 19200 bauds. O protocolo usa pacotes de 1 a 4 bytes, sendo os pacotes de 4 bytes utilizados para mandar um comando e receber uma resposta. Os pacotes de 1 byte são utilizados

para reconhecimento(0x86), não reconhecimento (0x15) e sinalização de atenção (0xFF). Cada byte é dividido em duas partes, onde os bits 0-6 valem por seus respectivos valores e o bit 7 é a paridade. O retorno do processador se dá sempre com o byte menos significativo primeiro.

Para determinar o status da câmara, se ela está ligada ou desligada, envia-se 0x9B, 0x08, 0x1C, 0x1C e se recebe 0x9B, 0x92, 0x7F, 0x7F ou 0x9B, 0x19, 0x7F, 0x7F, respectivamente.

Para aciona o obturador deve ser enviada uma seqüência 0x9B, 0x01, 0x7F, 0x1C. Se o dispositivo for acionado normalmente o sistema retorna 0x86.

Pode-se determinar o número da última foto, enviando 0x9B, 0x07, 0x1C, 0x1C. O sistema retornará 0x9B, 0x10, 0xXX, 0xYY onde XX YY é a resposta do contador. Para se determinar o número da foto no formato decimal deve-se efetuar a seguinte operação: $NRO = ((\text{byte}[2] \& 0x7F) - 0x1C) + 100 * ((\text{byte}[3] \& 0x7F) - 0x1C)$. O $\text{byte}[0] == 0x9B$ e o $\text{byte}[1] == 0x10$.

No caso de se utilizar uma câmara fotográfica digital que não aceite comandos diretos da base computacional através de um protocolo específico deve-se considerar a necessidade de construção de uma interface própria que utilize, por exemplo, o cabo de controle remoto da câmara, sistema esse presente em praticamente todas as câmaras de mais alto padrão, como a SONY F-828.

Assim deve-se substituir a chave de acionamento à distância por um relé, posto em funcionamento pela saída serial ou paralela do computador, facilmente controlada por *software* e que provê um pulso com características (tensão, corrente, tempo) necessárias ao funcionamento de tais dispositivos.

- Protocolo GPS. Em relação ao sistema de posicionamento deve-se atentar para três tarefas distintas: a) O sistema computacional deve ser dotado de um interpretador para as mensagens NMEA, para sincronizar o relógio do computador com o do sistema GPS. Isso garante que um dado de tempo coerente será registrado com os dados do sistema inercial. As mesmas mensagens carregam a primeira aproximação para as coordenadas do

receptor. Esses dados podem subsidiar uma representação gráfica da trajetória da aeronave e para as posições de tomada das imagens no caso de levantamento com alvos isolados. b) O sistema, ainda, deve estar registrando integralmente a portadora, para o pós-processamento dos dados. c) Finalmente, é interessante que o sistema esteja habilitado a enviar mensagens ao receptor solicitando um “tag” a cada tomada fotográfica, a fim de que a melhor estimativa para essa posição seja potencialmente obtida no pós-processamento. Abaixo, na tabela 6, o exemplo de um trecho de mensagem NMEA.

TABELA 6. CONFIGURAÇÃO DE UM TRECHO DE MENSAGEM NMEA

\$GPGGA,092204.999,4250.5589,S,14718.5084,E,1,04,24.4,19.7,M,,,0000*1F

Campo	Valor	Comentário
Sentence ID	\$GPGGA	
UTC Time	092204.999	hhmmss.sss
Latitude	4250.5589	Ddmm.mmmm
N/S Indicator	S	N = North, S = South
Longitude	14718.5084	dddmm.mmmm
E/W Indicator	E	E = East, W = West
Position Fix	1	0 = Invalid, 1 = Valid SPS, 2 = Valid DGPS, 3 = Valid PPS
Satellites Used	04	Satellites being used (0-12)
HDOP	24.4	Horizontal dilution of precision
Altitude	19.7	Altitude in meters according to WGS-84 ellipsoid
Altitude Units	M	M = Meters
Geoid Separation		Geoid separation in meters according to WGS-84 ellipsoid
Separation Units		M = Meters
DGPS Age		Age of DGPS data in seconds
DGPS Station ID	0000	
Checksum	*1F	
Terminator	CR/LF	

O texto acima, embora superficial para a real composição de um protótipo ainda inédito no Brasil, indica uma forma viável de integrar os principais elementos de um sistema aerofotogramétrico de baixo custo baseado em câmaras digitais de pequeno formato.

3. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS E PRINCIPAIS ALGORITMOS

Até esse ponto do texto foram tratados aspectos contextuais da aerofotogrametria, suas relações com a cartografia brasileira, sua inserção num mercado bastante heterodoxo, sobre a proposta de uso de um sistema alternativo de baixo custo e sobre a configuração de um protótipo baseado na integração de dispositivos comercialmente habituais. A partir daqui serão abordados temas afeitos à técnica envolvida na extração da informação das imagens, cuja objetividade, solidez e pragmaticidade são incontestavelmente maiores. Seu tratamento costuma ser, pois, bem mais aprazível aos olhos de quem é habituado às ciências exatas e prefere ser refém das relações entre os números que expressam as grandezas físicas do que àqueles que expressam moeda corrente.

3.1. Modelos Matemáticos Fotogramétricos

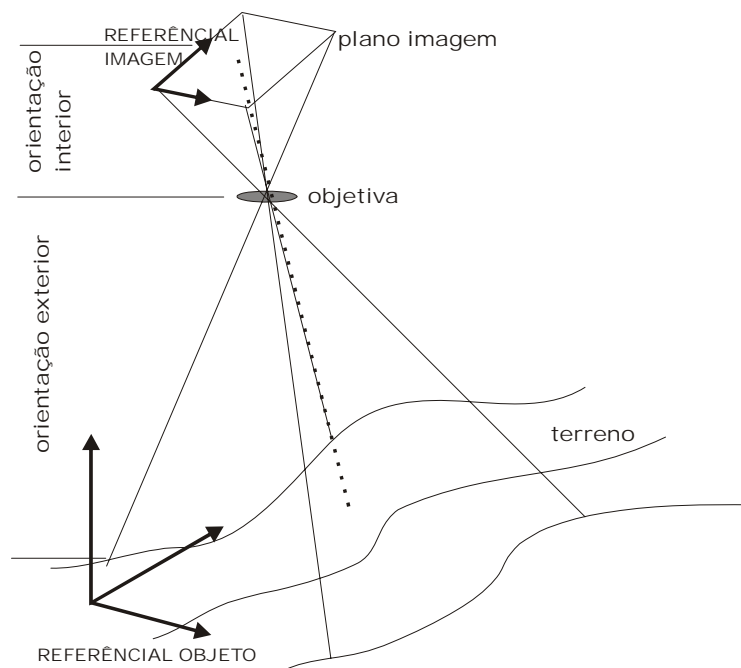
Orientação interior e orientação exterior são termos correntes e consolidados na linguagem fotogramétrica. Em referências consagradas como Andrade, (1998) e Lugnani (1987), nos manuais de fotogrametria e entre outros inúmeros textos acadêmicos e comerciais podem ser encontrados aspectos da evolução histórica desses conceitos, desde a fotogrametria analógica até a atual fotogrametria digital. Ainda, deduções detalhadas e análises matemáticas bem mais avançadas do que as aqui apresentadas. No entanto, para o objeto do estudo realizado os detalhes redigidos a seguir devem cumprir a sua finalidade.

O fundamento da Fotogrametria está erigido sobre as bases da óptica geométrica. Essencialmente sobre a propagação da luz no vácuo, em meios rarefeitos e na matéria transparente, idealmente considerada como sendo resultado do deslocamento em linha reta de um feixe de raios, ou de fótons (característica dual onda/partícula dos modelos de propagação da radiação

eletromagnética). A reconstrução das condições do sistema no instante de obturação da câmara é o alvo da modelagem matemática exigida para uma solução completa, tridimensional, dos alvos fotografados. Ainda hoje essa técnica é a mais abrangente, complexa e, ao mesmo tempo, produtiva representação da realidade.

A referida modelagem costuma ser efetuada em dois domínios. Todos os elementos determinantes da recuperação da geometria colinear do feixe estão relacionados à orientação interior. As variáveis que permitem equacionar o feixe desde a câmara até o terreno compõem a orientação exterior. A Figura 8 ilustra esse modelo.

FIGURA 8. ORIENTAÇÃO INTERIOR E ORIENTAÇÃO EXTERIOR DO FEIXE PROJATIVO



3.1.1. Orientação interior

Teoricamente é muito simples a geometria envolvida na orientação interior. O plano onde se forma a imagem nítida está a uma determinada distância do centro óptico do sistema de lentes. O feixe luminoso ingressa na superfície da lente necessariamente atravessa esse centro óptico e viaja em linha reta até o plano. Uma vez que seja conhecida essa distância focal e o ponto sobre o plano fotossensível onde se projeta o eixo óptico das lentes (único feixe que não muda de direção ao atravessar as lentes) torna-se possível medir a posição fotogramétrica de qualquer alvo sobre a imagem.

Em sua primeira versão, tal qual obtida pela transferência direta do arquivo gravado em meio digital no interior da câmara, a imagem está referenciada a um sistema cujas coordenadas correspondem meramente à contagem de pontos em linhas e colunas a partir de um ponto origem, normalmente o píxel superior esquerdo do CCD. O píxel é o “átomo” da imagem. O píxel (forma compacta do inglês *picture element*), é resultado da discretização do espaço objeto pelo sistema sensor CCD. Esse é o chamado sistema de imagem.

Tendo em vista o objetivo proposto, o primeiro passo para restaurar matematicamente o feixe é converter as coordenadas linha e coluna do sistema imagem para outro sistema de coordenadas métricas, mais facilmente correlacionado ao sistema de medidas do espaço objeto e dos parâmetros da câmara (normalmente em m e mm), com origem no centro da imagem, ou seja, no centro do CCD, ponto onde deveria estar materializada a origem do eixo óptico. Esse sistema pode ser dito pseudofiducial.

Nos dispositivos analógicos a imagem fica originalmente impressa num filme fotográfico. Como se sabe, essa mídia está sujeita a variações dimensionais. Marcas fiduciais são pontos facilmente notáveis nas bordas da fotografia, resultantes da projeção de posições específicas do corpo rígido da câmara e cujas coordenadas são precisamente conhecidas em relação a um referencial próprio, fixo também à câmara, idealmente contendo o eixo óptico (na prática, muito próximo dele). A medição de objetos sobre a imagem passa

necessariamente por ler as coordenadas dessas marcas e modelar uma função transferência que as leva às coordenadas fiduciais. Essa função modelada, utilizada no refinamento das coordenadas de demais pontos lidos, é fundamental para resultados altamente precisos.

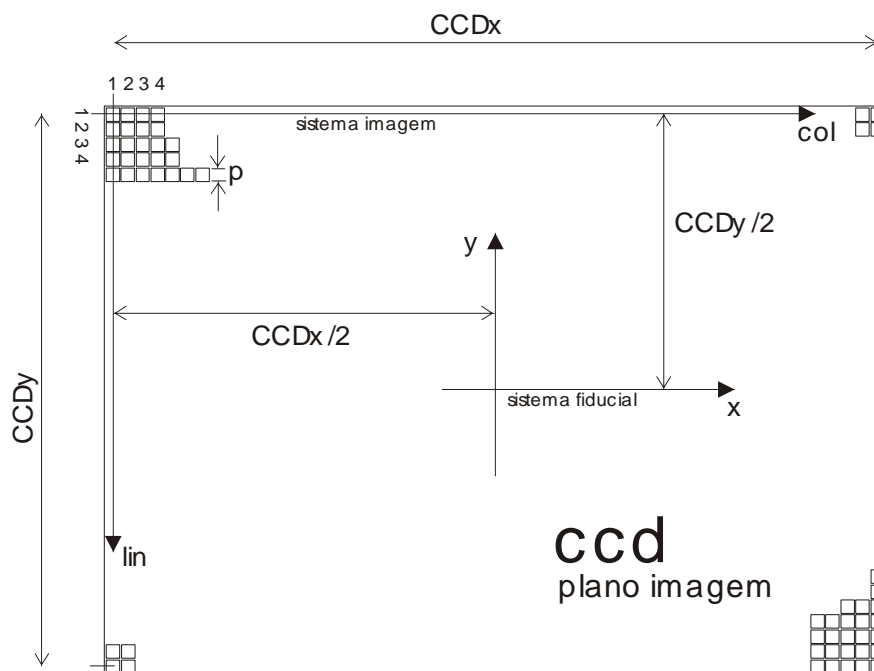
O modelo afin geral, ou o isogonal, costuma ser utilizado para efetuar a modelagem entre o sistema imagem e o sistema fiducial, no caso das imagens analógicas digitalizadas, por exemplo. No caso mais genérico, o afin geral, considera-se a possibilidade de não ortogonalidade dos eixos, rotação da imagem, translação para nova origem e diferentes escalas nos eixos x e y: seis parâmetros modelam todos esses erros. Quatro marcas fiduciais permitem escrever oito equações para solução com estimativa de precisão desses parâmetros.

No caso das câmaras digitais considera-se o sensor rígido e como a imagem é armazenada em meio magnético e/ou óptico (imagem virtual) não pode sofrer qualquer variação dimensional desde sua obtenção. Assim, evidentemente, a conversão do sistema imagem para o pseudofiducial será executada como uma simples translação, escala e mudança de orientação do eixo y, desprezando-se todas as outras possibilidades de divergências entre os sistemas de coordenadas envolvidos, conforme Figura 9.

A equação para transformação, facilmente dedutível, está abaixo apresentada. Como na Figura 9, x e y são as coordenadas pseudofiduciais; w e h as coordenadas no sistema imagem; p é o tamanho do píxel em mm; *col* e *lin* são as dimensões do CCD também em mm; *col*_o e *lin*_o são as coordenadas do primeiro ponto da imagem, correspondente a posição superior esquerda do CCD. Dependendo do sistema computacional onde a leitura dos pontos será executada, esse ponto pode ter, arbitrariamente, coordenadas (0,0) ou (1,1).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & -p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} col - \left(\frac{col_{\max} - col_o - 1}{2} \right) \\ lin - \left(\frac{lin_{\max} - lin_o - 1}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

FIGURA 9. OS SISTEMAS REFERENCIAIS NA ORIENTAÇÃO INTERIOR



Hipóteses simplificadoras importantes estão sendo feitas aqui. Reitera-se: o CCD é um elemento rígido, plano, fixo no corpo da câmara, mantendo, portanto, constante sua posição relativa à objetiva, de geometria conhecida, composto de um arranjo precisamente retangular de píxeis quadrados, cujo lado vale p . Se qualquer dessas assertivas não se verificar estará comprometida a precisão das medidas efetuadas sobre a imagem, no entanto, pesquisas recentes têm comprovado a validade dessas premissas, como em Machado et al (2003).

A condição idealizada, de colinearidade do feixe antes e após chegar a objetiva da câmara sofre ainda alguns outros efeitos capazes de deteriorar o resultado das medidas sobre a imagem. Tais efeitos são devidos à impossibilidade de construir objetivas perfeitas e de posicioná-las com eixo óptico na condição prevista. No entanto, esses erros são passíveis de correção uma vez que se tenha o cuidado de submeter a câmara a um processo de calibração, ou seja, da determinação matemática dos parâmetros de orientação interior, conforme será abordado no item seguinte desse capítulo.

O conjunto desses efeitos atualmente conhecidos e modelados é:

- Deslocamento do ponto principal. Quando se transforma as coordenadas do sistema imagem para o sistema pseudofiducial aplica-se uma translação para o centro do CCD. No entanto é praticamente impossível garantir que a intersecção do eixo óptico do sistema de lentes coincida com essa origem (conhecido como ponto principal). A medida das componentes do afastamento entre tais pontos é estimada por dois parâmetros x_0, y_0 . Em outras palavras, aplicar essa correção às coordenadas corresponde a efetuar uma translação para um novo sistema, dito fotogramétrico.

- Distorções radiais simétricas. Trata-se da mais importante das distorções produzidas pelo sistema de lentes, mais especificamente devido à aberração esférica das lentes. Esse efeito é modelado por um polinômio de alta ordem conforme pode ser visto em Andrade (1998).

- Distorção radial descentrada. Trata-se de um efeito de segunda ordem, que em muitos processos de calibração de câmaras digitais de baixo custo resulta não significativo, e é gerada pela impossibilidade de perfeito alinhamento do sistema de lentes das objetivas.

- Não ortogonalidade dos eixos cartesianos. Pode-se prever que o plano do CCD não esteja precisamente colocado de forma perpendicular ao eixo focal. Assim a imagem se formará numa projeção onde os eixos cartesianos não estarão ortogonais. Uma correção linear em função das ordenadas do ponto faz-se então necessária.

Salienta-se que, para efeitos práticos as duas últimas correções, devidas à distorção radial descentrada e à não ortogonalidade dos eixos, não se mostram significativas e têm sido desprezadas sistematicamente nos processos fotogramétricos, inclusive nos sistemas comerciais que manipulam esse tipo de dado.

Uma outra questão importante envolve a refração fotogramétrica. A linha orientada segundo o sistema fotogramétrico no interior da câmara projeta-se através da atmosfera até o alvo, caminho inverso ao percorrido pelos fótons refletidos em sua trajetória até o sensor. O segmento interno à

câmara é, pois, colinear ao segmento externo, uma vez que admite a inexistência de erros sistemáticos .

A idealização da reta ligando o espaço imagem e o espaço objeto fica prejudicada por efeitos refrativos indesejáveis não só devido as lentes mas também pelo fato da atmosfera possuir um índice de refração mutável em função da variação na massa específica dos gases que a compõem na medida em que se afasta da superfície da Terra. Portanto, o feixe acaba declinando radialmente e esse erro pode ser significativo quando da tentativa de aplicar o modelo da colinearidade abordado na seqüência.

Esse é um efeito complexo e os modelos para sua correção são empíricos e relacionam parâmetros de difícil realização. A alternativa mais viável, diante da impossibilidade de se efetuar medidas atmosféricas mais precisas que permitam correções mais adequadas (como as sugeridas por Andrade, 1977), é considerar o efeito atmosférico como uma parcela a mais no deslocamento radial do feixe interior. Essa parcela é proporcional às coordenadas no referencial fotogramétrico depuradas dos efeitos das lentes e a um parâmetro conhecido como ε_{45} , o índice de refração de uma atmosfera padrão para um feixe cujo ângulo de entrada na lente seja 45°. As equações para essas correções, a serem aplicadas quando da depuração das coordenadas no espaço imagem, são:

$$\delta x = x' \cdot \varepsilon_{45} \cdot \left(\frac{r^2}{f^2} + 1 \right) \quad (5)$$

$$\delta y = y' \cdot \varepsilon_{45} \cdot \left(\frac{r^2}{f^2} + 1 \right) \quad (6)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{45} = 13 \cdot (Z_c - Z_p) \cdot [1 - 0.02(2 \cdot Z_c + Z_p)] \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

A expressão para cálculo de ε_{45} é uma aproximação apresentada por Saastamoinen (apud Lugnani, 1987), válida, a princípio, para uma atmosfera padrão no território norte americano. Nela Z_c é a altitude de vôo e Z_p a altitude média do terreno, ambas medidas em quilômetros. De fato não é

correto aplicá-la nas condições de nosso território e talvez por isso seja desprezível o efeito dessas correções no caso em questão. Para um ponto na borda de uma imagem digital obtida a cerca de 800 m de altura o valor máximo estimado atinge 10^{-4} mm, um valor pelo menos dez vezes menor do que a dimensão do pixel, na Sony F-828 igual a $3,3 \mu\text{m}$.

Assim, não há sentido em aplicar tal correção, a menos que outros modelos sejam utilizados (mais precisos e que levem em conta, por exemplo, a influência da camada limite de ar junto a lente com a aeronave em movimento) (Andrade, 1977).

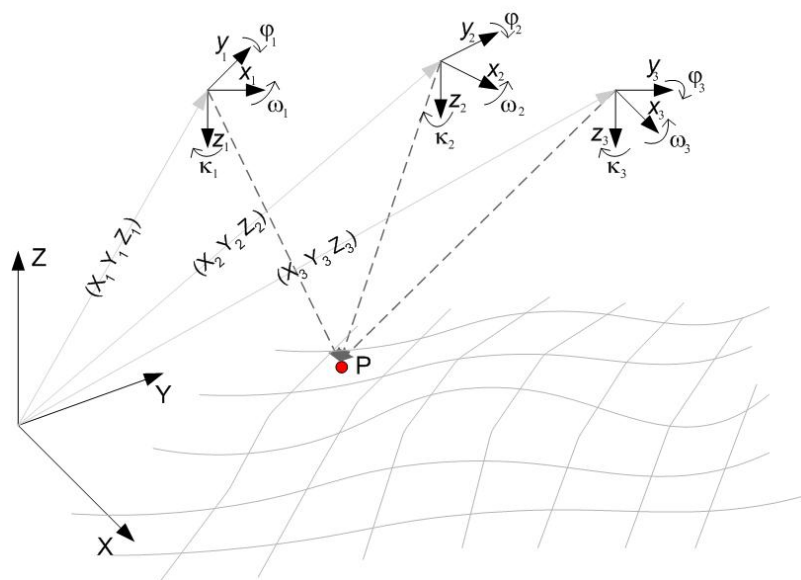
3.1.2. Orientação exterior

A orientação interior refere-se à solução geométrica do feixe no interior da câmara, ou seja, sob o ponto de vista de um observador fixo à superfície da terra, a medida que a plataforma que carrega a câmara se movimenta a posição do referencial se altera. Compatibilizar esse referencial interno a um único referencial geodésico de forma a permitir a modelagem acoplada de todas as imagens é o principal objetivo da orientação exterior.

Um sistema referencial tridimensional ortogonal, comumente associado a referenciais geodésicos, será único na orientação da linha que liga cada ponto da imagem ao seu real correspondente no terreno, como a Figura 10 sugere.

As coordenadas de qualquer ponto medido sobre a imagem são conhecidas em relação a um referencial, o mais próximo que se pode materializar do ideal dito referencial fotogramétrico. A restituição das coordenadas desse ponto sobre o terreno, na outra extremidade da linha, poderá ser executada desde que conhecida a posição e orientação desse referencial imagem em relação a um referencial geodésico local, descrito como referencial objeto. Essa também é uma das formas de se definir o processo de orientação exterior.

FIGURA 10. OS SISTEMAS REFERENCIAIS NA ORIENTAÇÃO EXTERIOR



Resolver, portanto, a orientação exterior passa por conhecer a posição do centro óptico (centro perspectivo) e a direção do eixo óptico no instante em que a fotografia é obtida. São, respectivamente, seis parâmetros: as coordenadas X_0 , Y_0 , Z_0 e os ângulos K , Φ e Ω , conhecidos como ângulos de Euller. Fisicamente, evidencia-se X_0 , Y_0 , Z_0 como as coordenadas do espaço onde se encontrava o centro óptico do sistema de lentes quando a câmara está sendo obturada ao longo da trajetória da aeronave. K , Φ e Ω configuram um conjunto de ângulos que orientam a câmara no mesmo instante, vinculados a atitude da aeronave, evidentemente. K está relacionado à rota do voo, Φ ao deslocamento angular da horizontal da linha proa/popa da aeronave e Ω ao deslocamento angular, medido também em relação a horizontal, da linha das asas da aeronave. Todos os deslocamentos angulares medidos no sentido anti-horário. Ainda, seguindo a convenção adotada para o referencial fotogramétrico, K , Φ e Ω são rotações em torno de z , y e x , respectivamente, para tornar esse referencial paralelo ao referencial geodésico local.

Esses seis parâmetros são extremamente difíceis de serem auscultados em tempo real, ou seja, enquanto o experimento fotogramétrico vai sendo executado. São necessários instrumentos extremamente precisos, como

receptores GPS de dupla frequência trabalhando em posicionamento relativo e sensores inerciais relativísticos, além do uso de recursos matemáticos como o filtro de Kalmann, para se tentar obter resultados com precisão suficiente.

O recurso então utilizado para resolver essa orientação é também matemático: o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados das observações das coordenadas de pontos notáveis, conhecidas em ambos os referenciais (imagem e objeto), seguindo o modelo consagrado da equação da colinearidade, a qual integra numa única e válida expressão todos os parâmetros de orientação exterior e as referidas coordenadas de pontos conhecidos, ditos de controle. A equação é:

$$\begin{aligned} x_f &= -f \frac{(X - X_o)(\cos \Phi \cos K) + (Y - Y_o)(\cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K) + (Z - Z_o)(\sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K)}{(X - X_o)(\sin \Phi) - (Y - Y_o)(\sin \Omega \cos \Phi) + (Z - Z_o)(\cos \Omega \cos \Phi)} \\ y_f &= -f \frac{-(X - X_o)(\cos \Phi \sin K) + (Y - Y_o)(\cos \Omega \cos K - \sin \Omega \sin \Phi \sin K) + (Z - Z_o)(\sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K)}{(X - X_o)(\sin \Phi) - (Y - Y_o)(\sin \Omega \cos \Phi) + (Z - Z_o)(\cos \Omega \cos \Phi)} \end{aligned} \quad (9)$$

A dedução dessa expressão pode ser vista detalhadamente, por exemplo, em Moffitt e Mikhail (1980). Nela, (X, Y, Z) e (x_f, y_f) são as coordenadas dos pontos de controle, respectivamente, no espaço objeto e no espaço imagem. As coordenadas no espaço imagem devem estar depuradas dos erros sistemáticos ou lidas sobre a imagem retificada de tais erros, conforme será proposto nesse trabalho; f é a distância focal calibrada; X_o, Y_o, Z_o e K, Φ, Ω os seis parâmetros de orientação exterior de cada foto.

Para obter solução de orientação exterior para uma única foto são necessários, no mínimo, três pontos de controle não alinhados. Para cada ponto, um par de equações pode ser escrito. Assim, seriam seis equações escritas para seis incógnitas. Para aplicar o ajustamento, no entanto, quatro pontos ou mais são necessários, havendo redundância de informações para estimativa da qualidade dos parâmetros obtidos e das medidas realizadas.

Esse processo é conhecido como recessão espacial. A solução do sistema de equações não lineares resultante é executado segundo o método de ajustamento paramétrico com injunção de posição e pode ser consultado, muito melhor do que aqui descrito, em Andrade (1998) ou Mitishita (1997). O método exige a estimativa de valores iniciais aproximados para todas as incógnitas.

Para estimar os valores X_0 , Y_0 , Z_0 e K , Φ , Ω , no caso dos experimentos dessa pesquisa, onde as áreas sobrevoadas possuíam dados cartográficos progressos, o seguinte processo pode ser aplicado:

- um sistema computacional gráfico compatível com o formato vetorial da base cartográfica disponível e com capacidade de apresentar as imagens deve estar disponível; é desejável que tal sistema possua ferramentas simples de integração de dados vetoriais e matriciais georreferenciados, tais como Autodesk Map, Microstation, ArcView/ArcGIS, IDRISI, entre tantos outros.

- a base cartográfica deve ser exibida;

- cada imagem deve ser integrada à base mediante um ajuste preliminar expedito pela seleção de dois pontos notáveis comuns nas áreas urbanas (esquinas, canteiros, prédios) escolhidos em quadrantes opostos, preferencialmente a meia distância entre o centro e a borda da imagem; com as coordenadas planas desses dois pontos pode-se obter quatro parâmetros de ajuste da imagem a base cartográfica: duas translações (Δx Δy), um fator de escala global (α) e um ângulo de rotação (Θ) (modelo conforme no plano). Ao final desse processo um mosaico das imagens sobrepostas estará disponível, como mostra a Figura 11.

- desse mosaico podem ser extraídos por medida direta, ou automática (utilizando-se ferramentas próprias dos sistemas e/ou linguagens de customização) os referidos quatro parâmetros anteriormente citados, que estarão direta ou indiretamente relacionados a X_0 Y_0 Z_0 e K . Δx Δy permitem a determinação das coordenadas do centro da imagem, por sua vez, boas

estimativas para X_0 , Y_0 . Θ é diretamente boa estimativa para K . A escala α com que a imagem é inserida no ambiente gráfico, pode facilmente retornar o valor Z_0 mediante uma simples manipulação algébrica.

FIGURA 11. AJUSTE PRELIMINAR DE UMA LINHA DE VÔO A UMA BASE CARTOGRÁFICA PRÉ-EXISTENTE



- Φ e Ω são inicialmente considerados nulos, hipótese assumida em função da tomadas das fotos aéreas em questão ser aproximadamente vertical e espera-se que tais valores, quando ajustados, nunca superem o valor de três graus.

Num dos experimentos de campo realizados e cujos dados estarão mais tarde sendo explorados, utilizou-se monitoramento de voo contínuo por GPS integrado ao sistema fotogramétrico digital de baixo custo. Esses dados, após o processamento, também resultam ótimas estimativas para os quatro parâmetros que acima foram medidos com auxílio do sistema gráfico computacional. X_0 , Y_0 , Z_0 são obtidos diretamente das medidas GPS. O

ângulo K pode ser estimado em função do deslocamento da aeronave entre duas posições onde as fotos foram adquiridas.

Esse processo de recessão espacial descrito é útil para orientação de uma única imagem, mas é pouco produtivo no caso mais genérico da aerofotogrametria, onde blocos de imagens são o produto ordinário. Se fosse assim aplicado um grande número de pontos de controle seriam necessários. E vale lembrar: obter tais pontos exige logística relativamente complexa, atualmente traduzida no posicionamento estático de receptores GPS.

A técnica classicamente utilizada para obtenção de melhores e mais eficientes resultados a custos bem menores vale-se da sobreposição fotogramétrica, garantindo um maior número de raios projetivos que convergem para um mesmo ponto no terreno.

Um bloco fotogramétrico, como se sabe, é composto de um conjunto interconectado de fotos isoladas, com alto grau de sobreposição (em geral é recomendado recobrimento de 60% entre fotos ao longo da linha de voo e 30% entre linhas). Dessa forma cada ponto deve aparecer no mínimo em duas imagens, porém, um grande número de pontos aparecerá em três ou quatro fotos e alguns em cinco, ou mesmo, seis fotos. A geometria surge dessa configuração é mostrada na Figura 10.

Considere-se, num primeiro momento, totalmente orientado o conjunto de fotos. Então, quando lidas as coordenadas de um determinado ponto em duas (ou mais) imagens pode-se escrever um sistema de equações para determinar suas coordenadas sobre o terreno com base no mesmo modelo apresentado na equação 9. Nesse caso X_0 , Y_0 , Z_0 e K , Φ , Ω de cada foto seriam conhecidos a priori e as coordenadas do ponto, X Y Z , serão as incógnitas. A superabundância de observações permitiria o ajustamento pelo mesmo método paramétrico da recessão espacial, conforme o equacionamento abaixo.

$$\begin{aligned}
x_1 &= -f \frac{(X - X_{o_1})(\cos \Phi_1 \cos K_1) + (Y - Y_{o_1})(\cos \Omega_1 \sin K_1 + \sin \Omega_1 \sin \Phi_1 \cos K_1) + (Z - Z_{o_1})(\sin \Omega_1 \sin K_1 - \cos \Omega_1 \sin \Phi_1 \cos K_1)}{(X - X_{o_1})(\sin \Phi_1) - (Y - Y_{o_1})(\sin \Omega_1 \cos \Phi_1) + (Z - Z_{o_1})(\cos \Omega_1 \cos \Phi_1)} \\
y_1 &= -f \frac{-(X - X_{o_1})(\cos \Phi_1 \sin K_1) + (Y - Y_{o_1})(\cos \Omega_1 \cos K_1 - \sin \Omega_1 \sin \Phi_1 \sin K_1) + (Z - Z_{o_1})(\sin \Omega_1 \cos K_1 + \cos \Omega_1 \sin \Phi_1 \sin K_1)}{(X - X_{o_1})(\sin \Phi_1) - (Y - Y_{o_1})(\sin \Omega_1 \cos \Phi_1) + (Z - Z_{o_1})(\cos \Omega_1 \cos \Phi_1)} \\
x_2 &= -f \frac{(X - X_{o_2})(\cos \Phi_2 \cos K_2) + (Y - Y_{o_2})(\cos \Omega_2 \sin K_2 + \sin \Omega_2 \sin \Phi_2 \cos K_2) + (Z - Z_{o_2})(\sin \Omega_2 \sin K_2 - \cos \Omega_2 \sin \Phi_2 \cos K_2)}{(X - X_{o_2})(\sin \Phi_2) - (Y - Y_{o_2})(\sin \Omega_2 \cos \Phi_2) + (Z - Z_{o_2})(\cos \Omega_2 \cos \Phi_2)} \\
y_2 &= -f \frac{-(X - X_{o_2})(\cos \Phi_2 \sin K_2) + (Y - Y_{o_2})(\cos \Omega_2 \cos K_2 - \sin \Omega_2 \sin \Phi_2 \sin K_2) + (Z - Z_{o_2})(\sin \Omega_2 \cos K_2 + \cos \Omega_2 \sin \Phi_2 \sin K_2)}{(X - X_{o_2})(\sin \Phi_2) - (Y - Y_{o_2})(\sin \Omega_2 \cos \Phi_2) + (Z - Z_{o_2})(\cos \Omega_2 \cos \Phi_2)}
\end{aligned} \tag{10}$$

Esse método é amplamente utilizado para medidas de objetos sobre a imagem, na restituição, e é conhecido como intersecção espacial.

Associe-se agora as duas aplicações do mesmo modelo matemático, aqui e comumente designadas como recessão e intersecção espacial, ou seja, um problema onde todos os parâmetros de orientação e as coordenadas no espaço objeto de pontos lidos nas imagens são incógnitos. Cada foto do bloco acresce as seis incógnitas da orientação exterior. Cada ponto acrescenta três incógnitas ao sistema. No entanto, evidentemente, um mesmo ponto será lido em mais de uma imagem, preferencialmente em quatro ou mais; são, então, geradas tantas equações quanto o dobro do número de fotos em que o ponto é identificado. Há, pois, superávit nesse balanço equações-incógnitas.

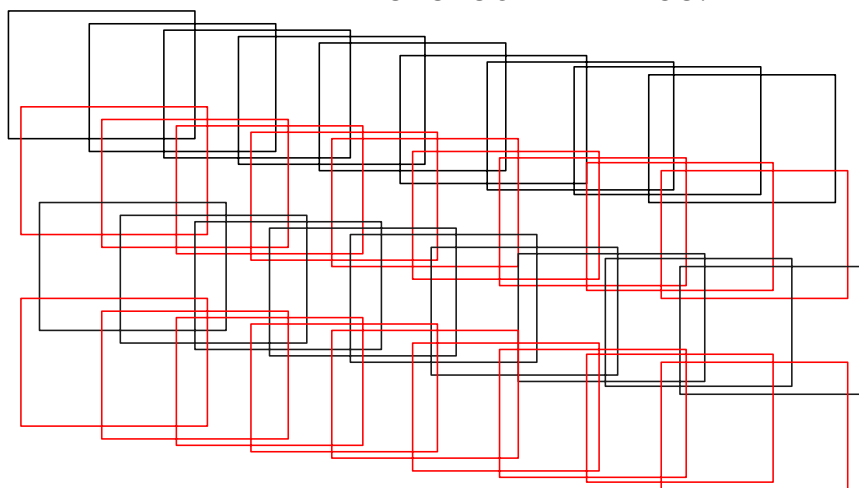
Isso ainda não é suficiente para o sistema ter solução. Na realidade, tal como sugerido, é um sistema com deficiência de *rank*. Deficiência que, para ser resolvida, exige a injunção de coordenadas de alguns pontos, ditos pontos de controle do bloco. O ajustamento pelos mínimos quadrados, método paramétrico, então pode ser aplicado para se obter as coordenadas de todos os pontos lidos e os parâmetros de orientação exterior de cada foto, bem como a estimativa de suas precisões. Essa é a mais adequada solução para o problema da fotogrametria digital, conhecida como *Bundle Block Adjustment*, cuja descrição detalhada remete a obras clássicas como Merchant (1979) e na bibliografia nacional Andrade (1990), dentre tantas outras.

Operacionalmente, são medidos pontos em todas as áreas de múltipla superposição. Pontos facilmente identificados e distribuídos uniformemente pela área imageada, especialmente nas posições próximas aos pontos de Grubber de cada foto. Alguns desses pontos devem necessariamente possuir

suas coordenadas conhecidas. E há determinadas regras na escolha do número e da posição dos pontos de controle para garantia da qualidade do ajustamento bloco.

Os manuais de fotogrametria apresentam expressões para cálculo do espaçamento mínimo entre esses pontos de controle, nominados também pontos de apoio, e divididos em dois grupos: apoio plano-altimétrico e apoio altimétrico. Essas expressões, no entanto, foram desenvolvidas com base na restituição fotogramétrica analógica. De forma equivalente aos resultados obtidos para vôos em escala compatível a restituição 1:2000 costuma-se adotar a configuração de apoio apresentada na Figura 12.

FIGURA 12. TÍPICA CONFIGURAÇÃO DO APOIO A UM BLOCO AEROFOTOGRAMÉTRICO.



Esses procedimentos foram todos utilizados na obtenção dos dados para realização da pesquisa aqui descrita. Embora muitos sistemas, inclusive comerciais, estejam disponíveis para realização de tal tarefa, alguns inclusive com automação de etapas como coleta de pontos de homólogos, uma instância do ajustamento foi implementada no ambiente operacional do MatLab®, com bom desempenho e que permitem futuro uso didático.

3.1.3. Calibração de Câmaras

O auge do desenvolvimento da calibração de câmaras ocorreu entre as décadas de 50 e 70. Uma revisão dos avanços científicos obtidos nesse período pode ser encontrada em Clarke e Fryer (1998). É consenso que o maior destaque nessa matéria deve ser atribuído aos resultados das experiências apresentados por Brown na Convenção Anual da Sociedade Americana de Fotogrametria, em 1965, publicados no ano seguinte (Brown, 1966). Além de revisar mais de 40 anos de estudos, Brown comprovou que era possível modelar as distorções descentradas das lentes com base na teoria ray-tracing, de Conrady, que data de 1919.

Também Brown (1971) é um artigo fartamente referenciado. Nele foi proposto o uso de um campo de calibração com linhas retas para determinar os parâmetros dos modelos de distorção, até então somente obtidos em laboratórios através de colimadores. Ainda hoje a maioria dos processos de calibração fundamenta-se na obtenção de fotos de campos de calibração e no modelo de Conrady-Brown.

É importante considerar que todo esse desenvolvimento teve por objeto câmaras métricas utilizadas em aerolevantamentos. Há, pois, consideráveis diferenças a serem observadas quando se aplicam tais métodos ao caso das câmaras digitais de pequeno formato. Como já se disse, são significativamente diversos os tamanhos das lentes, as distâncias focais, a área onde a imagem é projetada. O próprio processo de fabricação no caso dessas últimas câmaras é a linha de produção, sujeita a um controle de qualidade menos exigente. Assim, o processo de calibração tem sido alvo de adaptações, no entanto, ainda sem profundas mudanças em relação ao método consagrado.

Publicações como as de Heikkilä e Silvén (1997), Zhang (1998) e Habib e Morgan (2003 e 2005), são amostras de experimentos que buscam aprimorar o processo de calibração de câmaras digitais de pequeno formato. Os padrões apresentados para calibração são tais como planos quadriculados, linhas dispersas no espaço tridimensional, cubos em cujas

faces são marcados padrões simétricos de pontos. Os modelos matemáticos para a geometria das distorções variam e o número de parâmetros também. Em face desse farto material de referência pode-se concluir serem temas de validação itens como:

- a estabilidade dos parâmetros com a variação de temperatura e com o uso contínuo do equipamento;
- a estabilidade da distância focal em função da possibilidade de zoom que as câmaras invariavelmente possuem;
- a não perpendicularidade entre o plano do CCD e o eixo focal;
- a parametrização das distorções radial simétrica e descentrada;
- a precisão na medida do tamanho e disposição dos píxeis;
- aspectos relacionados a super-parametrização, o mal condicionamento dos sistemas no ajustamento, a otimização de algoritmos e, mesmo, sua robustez.

Alguns desses estudos vêm sendo empreendidos no Laboratório de Fotogrametria da UFPR, como em Gonçalves e Mitishita (2004) e Machado et al. (2004). O campo de calibração utilizado nesses experimentos também tem sido referenciado ultimamente e trata-se de um conjunto de alvos pintados sobre uma parede com coordenadas tridimensionais precisamente conhecidas.

As dimensões do campo são tais que permitem obter boas imagens usando câmaras de 2 a 8 Mpíxeis com foco no infinito, garantindo a projeção de alvos em toda área do CCD, a cada tomada. O tamanho dos alvos também está compatível com a resolução média dessas câmaras de tal forma que se tornem facilmente visíveis e seus centróides fiquem registrados num número pequeno de píxeis.

Uma vez adquirido o conjunto de imagens, efetua-se a leitura das coordenadas de cada alvo nas mesmas. Estarão conhecidas, pois, as coordenadas dos alvos no espaço objeto e no espaço imagem, para cada fotografia. Resta executar um processo de recessão espacial a partir do

ajustamento simultâneo de feixe de raios (processo já citado como conhecido na bibliografia especializada como *Bundle Adjustment*), porém com o acréscimo de novos termos no modelo, como o proposto nas equações:

$$\begin{aligned} x &= \delta x - f \frac{(X - X_o)(\cos \Phi \cos K) + (Y - Y_o)(\cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K) + (Z - Z_o)(\sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K)}{(X - X_o)(\sin \Phi) - (Y - Y_o)(\sin \Omega \cos \Phi) + (Z - Z_o)(\cos \Omega \cos \Phi)} \\ y &= \delta y - f \frac{-(X - X_o)(\cos \Phi \sin K) + (Y - Y_o)(\cos \Omega \cos K - \sin \Omega \sin \Phi \sin K) + (Z - Z_o)(\sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K)}{(X - X_o)(\sin \Phi) - (Y - Y_o)(\sin \Omega \cos \Phi) + (Z - Z_o)(\cos \Omega \cos \Phi)} \end{aligned}$$

onde, (11)

x, y são as coordenadas dos alvos no espaço imagem;

X, Y, Z são as coordenadas dos alvos no espaço objeto;

X_o, Y_o, Z_o são as coordenadas do centro perspectivo, posição da câmara, no espaço objeto;

K, Φ, Ω são os ângulos de orientação do eixo óptico;

$\delta x, \delta y$ são as correções dos erros sistemáticos.

Os novos termos δx e δy são na realidade a somatória dos erros sistemáticos produzidos internamente na câmara, citados anteriormente e desenvolvidos para o conjunto de modelos parametrizados nas equações:

$$\begin{aligned} \delta x &= x_o + \left\{ (x - x_o) \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \right\} + \left\{ p_1 \left[r^2 + 2(x - x_o)^2 \right] + 2p_2 (x - x_o)(y - y_o) \right\} + A(y - y_o) \\ \delta y &= y_o + \left\{ (y - y_o) \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \right\} + \left\{ p_2 \left[r^2 + 2(y - y_o)^2 \right] + 2p_1 (x - x_o)(y - y_o) \right\} + B(y - y_o) \end{aligned} \quad (12)$$

onde,

x_o, y_o é o deslocamento do ponto principal;

k_1, k_2, k_3 são os coeficientes do polinômio que modela a distorção radial simétrica;

p_1, p_2 são os coeficientes do polinômio que modela a distorção descentrada;

r é a distância ao ponto principal dada por $[(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2]^{1/2}$.

A e B os parâmetros de não ortogonalidade entre o eixo focal e o plano do CCD.

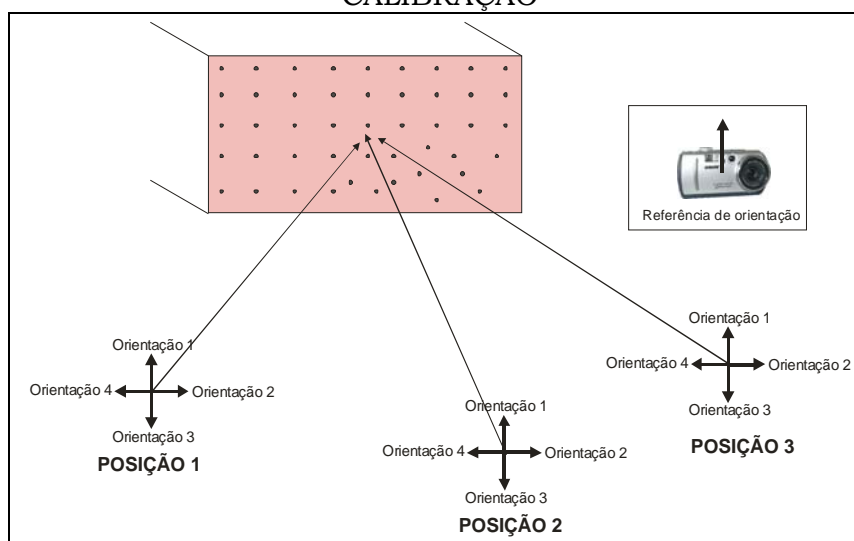
Essa é condição mais genérica encontrada hoje na literatura. A solução desse sistema não linear de equações pelo ajustamento de

observações, método paramétrico, leva ao conhecimento dos chamados parâmetros de calibração: x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , A , B , e f .

Com relação ao ajustamento referido cabe uma importante observação. Brown (1971) chama a atenção para a alta correlação entre os parâmetros de calibração e a localização e orientação da câmara. Andrade (1998) também apresenta uma análise detalhada sobre essa correlação no caso da calibração de câmaras aerofotogramétricas pelo método dos campos misturados. Para minimizar esse problema na determinação dos parâmetros é recomendado utilizar um conjunto de múltiplas imagens obtidas segundo a configuração mostrada na Figura 13. Ou seja, para segurança dos resultados, devem ser executadas 12 tomadas fotográficas. São escolhidas 3 posições sobre o nível do terreno, uma aproximadamente centrada, uma à esquerda e outra à direita do campo. De cada posição são feitas 4 fotos, efetuando rotações de 90° em relação ao eixo óptico da câmara.

Pode-se perceber o quanto trabalhoso é reconhecer manualmente um grande número de alvos sobre tantas imagens. Porém, hoje, são comuns os algoritmos para automatizar essa tarefa, como testado em Gonçalves e Mitishita (2004). Ainda assim é uma tarefa que deve ser supervisionada e revisada para segurança dos resultados.

FIGURA 13. POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS TOMADAS FOTOGRÁFICAS PARA CALIBRAÇÃO



Uma alternativa a esse processo foi testada no âmbito dessa pesquisa, considerando a hipótese de que se otimiza o tempo de processamento fotogramétrico quando se trabalha com imagens retificadas, onde as fontes de erros sistemáticos são pré-conhecidas e modeladas.

O fluxo normal da informação fotogramétrica possui uma seqüência de operações consagradas: ler coordenadas do ponto na imagem, depurar as coordenadas dos erros sistemáticos, aplicar a condição de colinearidade. Um problema inverso seria: dadas as coordenadas de um ponto no terreno, adicionar algebricamente os erros sistemáticos e determinar que ponto da imagem corresponde a esse alvo.

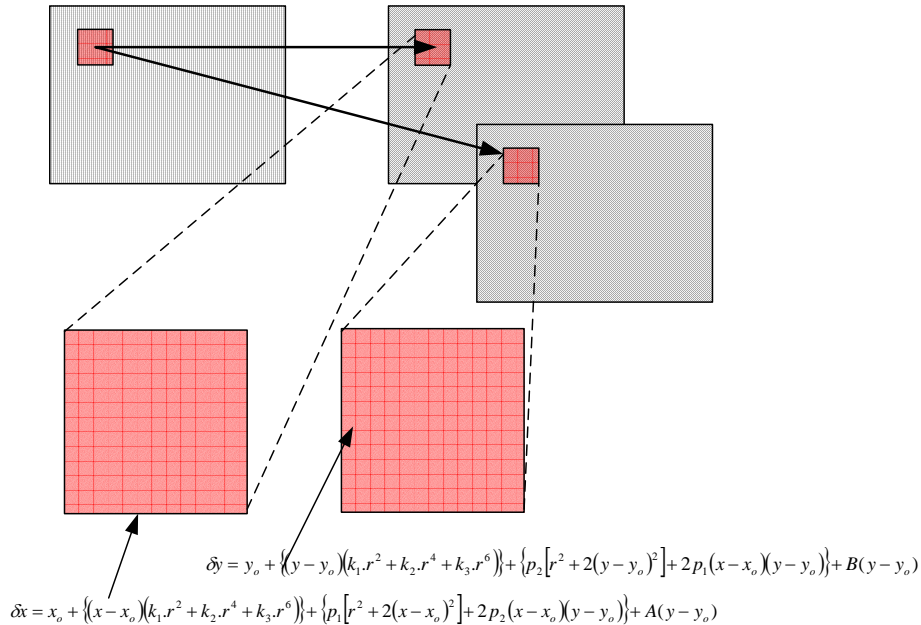
Observe-se que quando o processamento se dá nesse sentido, do espaço objeto para o espaço imagem, haverá necessidade da solução de equações implícitas, utilizando métodos iterativos como Newton-Rapson, uma vez que os parâmetros de calibração são obtidos a partir das coordenadas de imagem brutas, justamente as incógnitas, conforme também detectado e descrito por Machado et al. (2004B). O erro de desconsiderar esse processo pode ser da ordem de alguns píxeis na borda das imagens, devido as distorções das lentes das câmaras fotográficas de pequenos formato serem relativamente grandes.

Assim, uma alternativa interessante é evitar a necessidade de computar os valores das expressões δx e δy a cada processamento de coordenadas. Para tanto cabe retificar a imagem antes de efetuar qualquer leitura sobre ela, aplicando uma reamostragem para correção dos erros. As coordenadas lidas, então, sobre o espaço imagem estão diretamente relacionadas com àquelas do espaço objeto pela equação da colinearidade, permitindo as transformações imediatas entre os dois espaços.

Em relação aos erros a serem considerados deve-se, a princípio, dispor dos parâmetros de calibração. Pode-se, então, calcular facilmente o deslocamento do feixe produzido para cada píxel do CCD, nas suas componentes x e y , utilizando-se as equações de δx e δy apresentadas em Eq. 12. Esse valores, reconvertidos em píxeis, podem ser arranjados como duas matrizes de dimensões idênticas as da imagem, que uma observação

mais atenta remete a dois mapas numéricos digitais das distorções, conforme ilustra a Figura 14.

FIGURA 14. PRINCÍPIO DOS MODELOS NUMÉRICOS DE CORREÇÃO PARA ERROS SISTEMÁTICOS



Esses mapas finais podem ser a base de um método iterativo bastante simples de reamostragem da imagem, descrito no algoritmo abaixo:

```

dados: I(lin,col) = imagem bruta;
      MNDlin e MNDcol = mapas numéricos das distorções;
criar: NI(lin,col) = nova imagem = 0;   Cont_NI(lin,col) = 0;
para i = 1 até lin
  para j = 1 até col
    lin_ni = i + MNDlin(i,j);
    col_ni = j + MNDcol(j,j);
    NI(lin_ni,col_ni) = NI(lin_ni,col_ni) + I(i,j);
    Cont_NI(lin_ni,col_ni) = Cont_NI(lin_ni,col_ni) + 1;
para i = 1 até lin
  para j = 1 até col
    if Cont_NI(i,j) > 1
      NI(i,j) = NI(i,j) / Cont_NI(i,j);

```

São dados a imagem (I) e os mapas de distorções (MND). Inicialmente são criadas duas estruturas acumuladoras matriciais do mesmo tamanho das imagens. Uma delas (NI) conterá a imagem reamostrada, a outra (Cont_NI) é um contador do número de píxeis da imagem original que contribui para a formação de cada píxel de NI.

O primeiro encadeamento iterativo varre toda a estrutura da imagem I e de MND. Para cada ponto determina a posição de NI correspondente àquela posição de I. Nessa posição acumula o valor do respectivo píxel e soma uma unidade na mesma posição do contador.

A segunda iteração varre o contador Cont_NI e em todas as posições onde vale mais do que a unidade efetua a normalização pelo valor no contador armazenado. Esse processo equivale a uma média dos valores dos píxeis que contribuíram para essa posição de NI. Nessa segunda verredura da estrutura Cont_NI pode-se prever um processo de interpolação para pontos que na reamostragem resultem sem contribuição.

O método de reamostragem descrito somente pode ser utilizado porque os valores de correção (ou deslocamento) normalmente são convergentes, monotonamente crescentes do centro da imagem para a sua borda e de pequeno valor, raramente ultrapassando a casa de uma dezena de píxel, ou seja, inferior a uma milésima parte do tamanho da imagem. Mesmo quando divergentes as correções permanecem monótonas e crescendo a uma taxa muito pequena comparada ao tamanho da imagem.

Como se sabe é altamente recomendável que o processo de reamostragem se dê em sentido contrário ao aqui utilizado. A varredura costuma ocorrer no espaço da imagem retificada, ou seja, parte-se das coordenadas dos píxeis da imagem retificada, calculando-se as coordenadas correspondentes no espaço da imagem original, adotando-se um método de interpolação sobre esses últimos. Normalmente é utilizado o método do vizinho mais próximo ou da média ponderada pelo inverso da distância.

Para os casos em questão, enquanto válidas as hipóteses acima descritas, os resultados são equivalentes e o processamento é bem mais

rápido quando executado no sentido imagem original para imagem retificada.

A aplicação do método descrito motivou uma outra questão. Uma vez que o espaço imagem é discreto e o mapa numérico de distorções pode ser aplicado com precisão, haveria a possibilidade de se obter diretamente, num processo de calibração, tal mapa, sem a necessidade de calcular parâmetros para equações que modelam individualmente o conjunto de erros sistemáticos decorrentes da imperfeição da câmara.

A resposta obtida, embora exija algum processamento extra, indica que bons resultados podem ser obtidos aplicando o seguinte algoritmo, denominado aqui “determinação direta do MND”:

- Construir um campo de calibração com alta densidade de pontos de referência, seguindo determinado padrão de simetria e com aparência que facilite sua identificação automática nas imagens. Considera-se aqui uma boa distribuição àquela que propicie a presença de um ponto de calibração para cada área de 50x50 píxeis do CCD. O padrão testado é tão somente um conjunto de linhas horizontais e verticais. Para a câmara Sony F828 em uso uma Figura plana retangular de 6 x 4,5 m coberta por linhas espaçadas de 15 cm resultando num reticulado com 1200 pontos de controle é suficiente. Tal padrão permite a obtenção de fotos a uma distância de 6 m, e cada píxel da imagem nessa condição corresponde a uma área de 1,5 x 1,5 mm, donde as coordenadas do conjunto de pontos devem ser conhecidas com precisão melhor que o milímetro.

- Obter as imagens. Como não há necessidade de ajustar parâmetros para modelagem dos erros sistemáticos não serão necessárias as 12 imagens do método das fotos convergentes. No entanto, um número maior de imagens permitirá medidas de confiabilidade do mapa obtido. Recomenda-se o uso de 3 imagens, duas aproximadamente centradas em relação ao plano (em posição natural e com a câmara em posição rotacionada) e uma deslocada à direita ou à esquerda convergindo para o campo ($\Phi = \pm 30^\circ$).

- Medir as coordenadas dos pontos no espaço imagem. Para isso é fundamental o uso do sistema de reconhecimento automático dos alvos,

como o descrito em Gonçalves e Mitishita (2004), pois serão mais de 1000 pontos identificáveis em cada imagem.

- Selecionar um conjunto de pontos próximos ao centro da imagem (no máximo afastado uma quarta parte da maior dimensão do CCD). Assume-se aqui a hipótese de nessas posições o valor das distorções provocadas pelo sistema de lentes não supera 0,5 do tamanho do píxel, (de Lara et al, 2004). Com esses pontos pode-se efetuar o processamento do ajustamento por feixe de raios com autocalibração, como citado anteriormente.

O resultado desse ajustamento apontará valores calibrados para distância focal f . Além disso, serão conhecidos os parâmetros de orientação exterior de cada uma das fotografias usadas na calibração.

- Determinar as coordenadas de todos os pontos de controle no espaço imagem. Com os valores ajustados no passo anterior (f , X_o , Y_o , Z_o , K , Φ e Ω) e as coordenadas dos pontos de controle do campo de calibração pode-se obter, pela aplicação da Eq. 9, as coordenadas em que cada um desses pontos estaria no sistema de imagem sobre o plano do CCD não houvessem erros sistemáticos afetando sua projeção.

- Determinar os deslocamentos produzidos em cada alvo, segundo os dois eixos de referência da imagem (x , y), comparando sua posição na imagem real e na imagem ideal sintetizada no passo anterior (resíduos do modelo).

- Interpolar os mapa de distorções (dx , dy) para todos os píxeis do CCD. Esse resultado é o mapa numérico dos erros sistemáticos produzidos pela câmara e pode ser utilizado no processo de reamostragem já descrito.

Um experimento dessa metodologia foi executado no âmbito dessa pesquisa e seus resultados serão apresentados no tópico 4.2.1.

3.2. Síntese, processamento e análise de imagens: aplicações integradas na fotogrametria digital

Algumas das mais bem sucedidas áreas de pesquisa da ciência da computação são a computação gráfica, o processamento digital de imagens e a análise de imagens. Conjunta ou individualmente elas subsidiam diversas aplicações fundamentais para o modo de vida dos dias atuais e estão diretamente ligadas a fotogrametria avançada.

A Figura 15 apresenta um diagrama adaptado de Gomes e Velho (1994), onde os conceitos citados são ilustrados. Sempre que de uma imagem original se obtém uma outra imagem com algumas de suas propriedades alteradas se está efetuando o chamado processamento digital de imagens. Essa nova imagem será normalmente resultado de algum tipo de realce, filtragem, de operações algébricas, de transformações, de mudanças no espaço de cores.

Na computação gráfica o objetivo é a síntese de imagens, ou seja, o sistema computacional efetua a tradução de uma linguagem formal, que descreve a geometria dos elementos gráficos, para um objeto pictórico. É o que classicamente ocorre nos sistemas CAD e SIG, bem como nos casos de ambiente modelados de realidade virtual.

Quando o fluxo se dá no sentido oposto, ou seja, quando da imagem são extraídas propriedades geométricas e/ou radiométricas de objetos e mesmo a interpretação dessas propriedades, diz-se um problema de análise de imagem. Os sistemas de visão computacional, bem como muitos dos problemas fotogramétricos, estão centrados sobre esse tema.

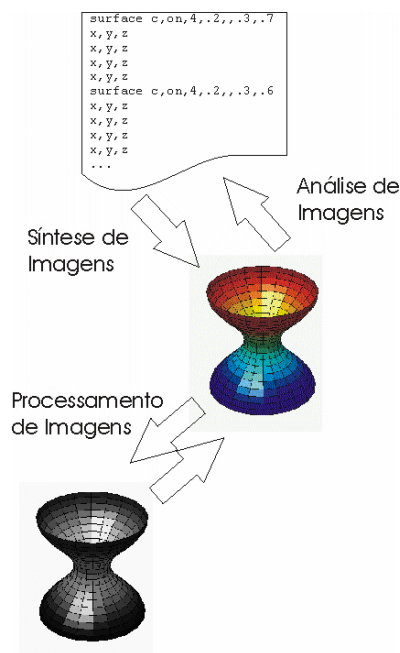
Várias das clássicas técnicas descritas nessas linhas de pesquisa serão utilizadas no intento de atingir os objetivos propostos nesse trabalho. Assim, do processamento digital de imagens serão explorados:

- correções radiométricas;
- correções geométricas e recortes.
- conversões do espaço de cores;
- segmentação de imagens.

Da análise de imagens serão importantes:

- classificação dos segmentos de imagem;
- rotulação dos segmentos;
- casamento de feições (*matching*).

FIGURA 15. OS CONCEITOS DE SÍNTESE, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS (ADAP. DE GOMES E VELHO, 1994)



Também a clássica aplicação conhecida como câmara sintética que envolve elementos da geometria computacional e a construção da projeção perspectiva, e é a base da síntese de imagens, estará sendo explorada na composição de imagens sintéticas fundamentais na metodologia adotada para o reconhecimento automático de objetos nas fotografias.

Segue, nos próximos itens, uma breve revisão desses tópicos.

3.2.1. Correções radiométricas nas imagens fotográficas

Uma imagem digital pode ser definida a partir de um processo estocástico de amostragem realizado sobre o mundo real. Amostragem espacial e radiométrica. Os pontos que compõe a imagem, seus píxeis, são resultantes da medida da radiação refletida ou emitida por uma área da superfície dos objetos presentes na paisagem real, efetuada num determinado intervalo de tempo (no caso das fotos um determinado instante em função do intervalo tender a zero) e discretizada num determinado número de níveis de intensidade.

Essa teoria é bastante conhecida e pode ser revisada em farto material técnico e didático sobre os fundamentos das imagens digitais, como em Gomes e Velho (1994), Gonzales e Woods (1992), Sonka et al (1999) entre outros tantos. Numa abordagem funcional, uma imagem pode ser também definida como um sinal discreto num domínio bidimensional e técnicas de processamento de sinais podem ser generalizadas para resolver problemas como ruídos, aumento de ganho, reamostragem e para focar determinada característica do sinal na busca de uma informação de maior valor.

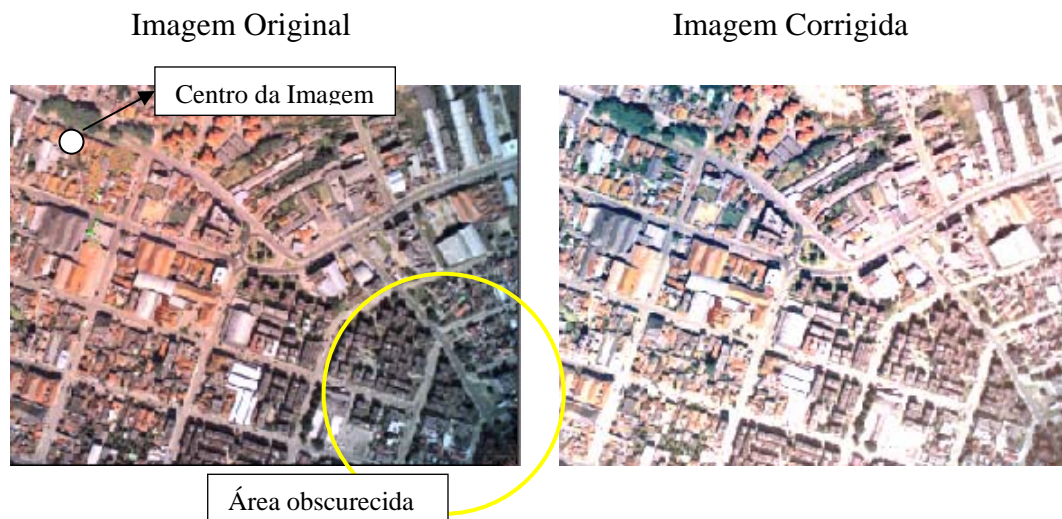
Nas imagens aerofotográficas como as aqui apresentadas, um conjunto de operações desse tipo serão utilizadas para corrigir algumas imperfeições, para compatibilizar a informação que advém da mesma região do terreno em imagens diversas, para corrigir e reprojeter espacialmente a imagem e para criar recortes específicos de cada lote da área urbana registrado.

A qualidade radiométrica das imagens aéreas adquiridas com as câmaras digitais utilizadas é bastante suficiente para discriminar precisamente as feições de interesse sobre paisagens urbanas. No entanto, é comum que haja uma degradação na intensidade da imagem do centro para as bordas, e no caso de um dos experimentos realizados esse efeito foi bastante significativo, como se nota na Figura 16.

A correção mais adequada dessa degradação exige realizar experimentos nas condições de vôo, com luz controlada de um alvo branco e difuso. Dessa forma toda e qualquer variação tonal poderia ser atribuída ao

efeito indesejável que, uma vez modelado, seria eliminado da imagem. No caso desse estudo as condições para execução desse experimento não estiveram disponíveis, donde se optou por aplicar algoritmo baseado na própria cena e na hipótese de aleatoriedade dos sinais presentes na imagem, cuja média local foi considerada invariável. Observe-se a seqüência de operações:

FIGURA 16. CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DO EFEITO SISTEMÁTICO DE ESCURECIMENTO DAS BORDAS. À ESQUERDA: QUADRANTE INFERIOR DIREITO DA IMAGEM ORIGINAL. À DIREITA: A MESMA IMAGEM CORRIGIDA.



- converter a imagem RGB para o espaço de cores IHS, intensidade, matiz e saturação.

- tomar a banda intensidade e ajustar uma função exponencial que modele a variação tonal evidenciada do centro para a borda da imagem. Isso é feito basicamente considerando os dados de um perfil que parte do centro da imagem para o ponto limite externo do primeiro quadrante, como mostra a linha em verde da Figura 18. Em seguida, consideram-se o valor da intensidade (I) como função da distância ao centro da imagem (r) e ajustam-se os parâmetros para uma função do tipo:

$$I = I_o + K.e^{-cr^2} \quad (13)$$

Os parâmetros ajustados serão I_0 , um *offset* de intensidade, uma escala K e a constante c . O gráfico da Figura 17 apresenta o tipo de variação modelado para a intensidade pela referida função. Na seqüência a Figura 18 mostra um perfil da imagem a ser corrigida, sobreposto da função ajustada.

FIGURA 17. FORMA GERAL DA CURVA AJUSTADA PARA MODELAR A VARIAÇÃO DE BRILHO NA IMAGEM.

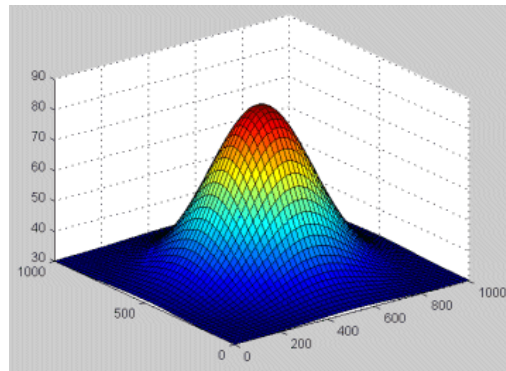
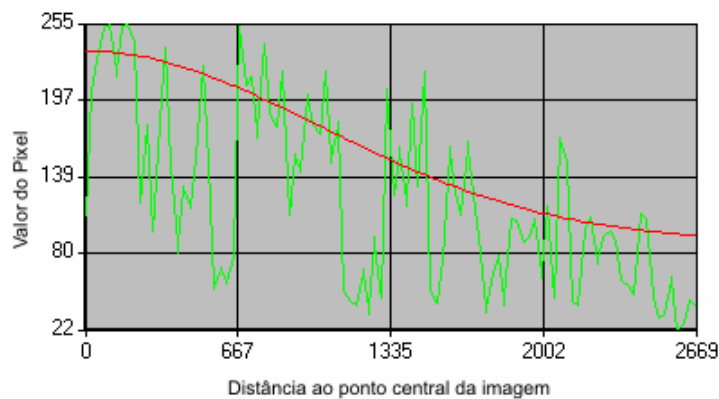


FIGURA 18. CURVA DE AJUSTAMENTO APLICADA SOBRE UM PERFIL AMOSTRADO DA IMAGEM MODELO DA FIGURA 16.



- Não houvesse essa sistemática redução no brilho da imagem e a variação da intensidade seria aleatória em torno de uma reta paralela ao eixo x . Cabe então aplicar aos pontos da imagem uma correção, calculada ponto a ponto a partir da função modelada, para que essa condição seja estabelecida, tal como:

$$I' = I + \Delta I \quad (14)$$

$$\Delta I = I_r - I_o + K e^{-cr^2} \quad (15)$$

onde I' é o novo valor da intensidade do píxel, I o valor original resultante da transformação IHS e ΔI é a correção para uniformização das intensidade. No cálculo de ΔI , além dos parâmetros já citados, I_r é um valor convencional de referência de intensidade, para o qual haverá a convergência da intensidade média. Na correção implementada esse valor foi arbitrado em 75% do máxima intensidade do perfil utilizado no ajustamento.

- Mantendo as bandas H e S originalmente calculadas e substituindo a banda I por I' , tal como acima descrito, aplica-se a transformação inversa do espaço de cores IHS para RGB. Um exemplo do resultado obtido, como visto, está apresentado na Figura 16.

Também é válido o procedimento de aplicar o algoritmo acima diretamente sobre cada uma das componentes de cores da imagem.

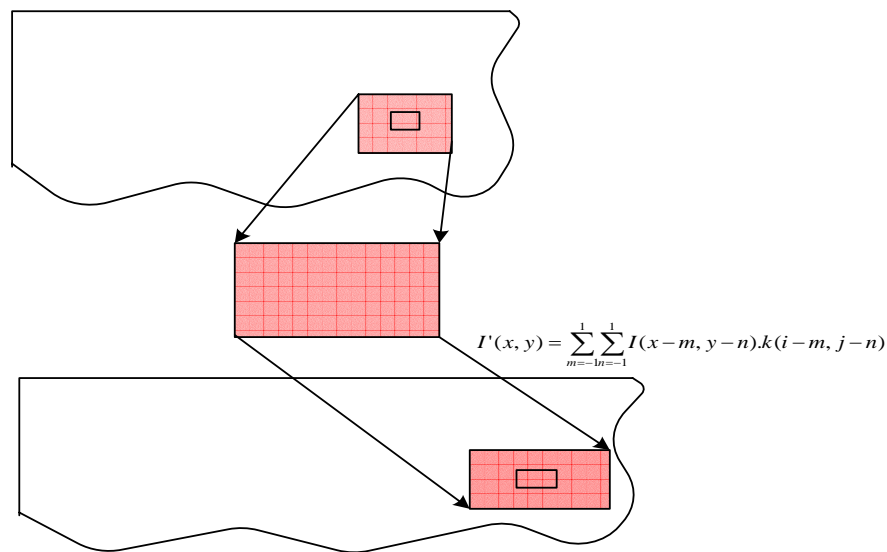
Manipulações dos histogramas também poderão ser aplicadas para qualificar visualmente as imagens, embora não sejam necessárias caso todos os cuidados com a configuração da câmara no momento da aquisição tenham sido tomados.

3.2.2. Filtros suavizadores seletivos

Uma das principais qualidades do foto-intérprete decorre do poder da visão humana em seletivamente ignorar variações não significativas nos sinais espacialmente adjacentes, agrupando áreas com determinada homogeneidade, normalmente identificadas como objeto do nosso mundo real. No processamento digital de imagens, as ferramentas de segmentação ainda estão sendo aprimoradas para cumprir essa tarefa. Assim, uma fase de suavização do sinal costuma ser aplicada para melhor desempenho dos algoritmos segmentadores.

Os filtros suavizadores podem ser aplicados sobre a imagem no domínio espacial ou espectral. No domínio espectral há um controle maior sobre as frequências espaciais atingidas pelo filtro. Operacionalmente, os modelos tratam o espectro da imagem, obtido pela aplicação da transformada de Fourier sobre a imagem original. No domínio espacial resultados similares podem ser obtidos pela convolução de uma função filtro sobre a função imagem. Essa operação possui também elevado processamento numérico, pois exige o deslocamento píxel a píxel de uma máscara numérica sobre a imagem, e a cada posição ocupada por esta deve-se efetuar o somatório normalizado do produto dos valores originais da imagem pelos valores das posições relativas equivalentes do filtro espacial, como a Figura 19 sugere.

FIGURA 19. PROCESSO DE FILTRAGEM POR CONVOLUÇÃO ESPACIAL (KERNEL)



O mais comum dos filtros suavizadores é o filtro média, cuja versão mais elementar é a matriz 3x3 cujos elementos valem 1/9. Evidentemente efetuar $\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} I_{ij}$ para cada pequeno bloco 3x3 da imagem sobreposta à máscara referida não é mais do que calcular a média da região e registrar esse valor no ponto central do bloco.

Aumentar o tamanho da matriz filtro torna o efeito ainda mais abrangente, ou seja, uma faixa maior das altas frequência espaciais será afetada e mais suavizada ficará a imagem final, com maior perda de detalhes.

Essas técnicas de suavização, no entanto, possuem uma grande restrição quando utilizadas para o fim aqui relatado: afetam de maneira uniforme toda a imagem e suavizam mesmo áreas onde os limites entre objetos estão presentes, dificultando assim sua precisa definição e reduzindo dramaticamente o desempenho dos detectores de bordas e dos segmentadores. Assim, uma classe de filtros suavizadores que preservam bordas na imagem foram pesquisados, definidos e descritos por autores como Somboonkaew et al (1999), Tomita e Tsuji (1997), Nagao e Matsuyama(1979) e Centeno e Haertel (1995) .

A base de alguns desses algoritmos é o uso de múltiplas máscaras, com formatos estratégicos diversos, como mostra a Figura 20. Essas máscaras são iterativamente movidas sobre a imagem, píxel a píxel, linha a linha, sendo aplicado o seguinte algoritmo:

- deslocar iterativamente uma janela do mesmo tamanho das mascaras por toda imagem, píxel a píxel, linha a linha;
- considerar como pontos ativos das máscaras somente aqueles onde o valor da máscara é a unidade;
- calcular a média e variância dos valores dos píxeis da imagem correspondentes aos pontos ativos;
- determinar a máscara com menor variância e atribuir ao píxel de interesse o valor da média da respectiva máscara;
- aplicar os passos acima para todos os píxeis da imagem;
- repetir iterativamente todo o processo até que nenhum píxel da imagem tenha seu valor alterado.

A Figura 21 é o recorte de uma pequena área de uma imagem aérea. Na Figura 22 está o resultado da aplicação do algoritmo descrito.

FIGURA 20. MÁSCARAS (KERNELS) DOS FILTROS SUAVIZADORES QUE PRESERVAM BORDAS DA IMAGEM

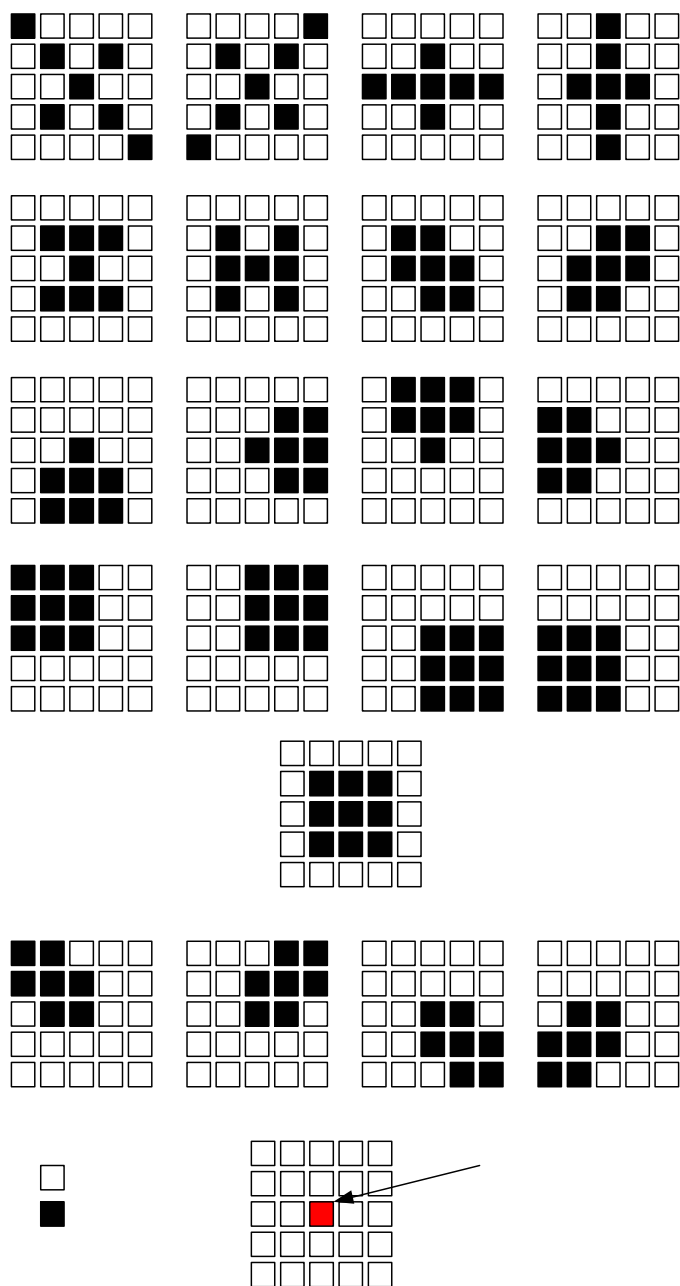


FIGURA 21. PEQUENO TRECHO DE UMA FOTOGRAFIA AÉREA DIGITAL



FIGURA 22. RESULTADO DA APLICAÇÃO DO FILTRO SUAVIZADOR COM PRESERVAÇÃO DE BORDAS DA IMAGEM DA FIGURA 21



Nas imagens coloridas, ou de diversas bandas, o processo deve ser repetido para cada banda. Pode-se também prover uma generalização da metodologia onde a média é calculada sobre vetores cujas componentes são

os respectivos valores de cores do píxel e o equivalente de heterogeneidade passa a ser o traço da matriz covariância dos pontos das máscaras.

Aplicado rigorosamente como descrito, tal método de suavização consome muito tempo de processamento, especialmente em relação a imagens aéreas, em geral de grandes dimensões. No caso de sua aplicação no escopo desse trabalho, como será descrito no capítulo sobre a metodologia, as imagens alvo do processamento serão parcelas das originais correspondentes à área de lotes urbanos, portanto, em geral, abrangendo pouco mais de 5000 píxeis. Além disso foi usual a implementação de um limite de iterações para um mínimo de 2% de píxeis alterados, ou seja, o sistema não itera até que se estabilizem os valores de todos os píxeis, mas sim até que 98% dos pontos estejam estabilizados.

3.2.3. Segmentação de imagens

A segmentação é um processo chave para o avanço da visão computacional de alto nível, que inclui a caracterização, detecção e classificação automáticas de objetos numa imagem. O resultado da segmentação, a princípio, é um conjunto discreto de regiões da imagem. Se uma imagem é um arranjo bidimensional de píxeis que contém medidas de determinadas propriedades dos objetos, uma região é um subconjunto de píxeis dessa imagem, contíguos e que guardam similaridade e consistência de uma propriedade medida.

O embasamento teórico da complexa relação segmentação-análise de imagens será apresentado em tópico específico, mais adiante. Aqui será apresentada somente uma breve revisão sobre técnicas de segmentação tradicionais, inclusive as utilizadas no escopo desse projeto.

São descritas várias técnicas de segmentação, que exploram propriedades como as cores, a textura, os gradientes (bordas), ou qualquer agrupamento dessas propriedades espaciais, para delimitar áreas homogêneas nas imagens.

Em relação ao princípio de funcionamento os algoritmos mais usuais operam com as técnicas de limiarização e crescimento de regiões.

Na técnica do crescimento de regiões aparece o conceito de sementes, pequenas partes da imagem com alta homogeneidade, onde limiares bastante restritos de distâncias espectrais devem ser obedecidos. Segue, então, uma varredura dos pixels contíguos visando o teste de associação segundo critérios de análise dos atributos da semente. O esboço de regiões estará sendo formado. Após essa fase são testadas as possibilidades de união de regiões, para as quais vários são os critérios disponíveis. Entre esses se destacam as medidas estatísticas, tais como o teste de Kolmogorov-Smirnov e a diferença da máxima média absoluta. Também se tornaram usuais os conceitos de debilidade de fronteiras e fagocitose, apresentados por Brice e Fennema (1970). Esse método é baseado numa analogia biológica do fenômeno onde uma célula se incorpora de alguma outra ou de partícula sólida por um processo de envolvimento total, flexibilizando sua membrana.

Nesse caso duas regiões são candidatas a se tornarem uma única região de acordo com a qualidade da sua fronteira comum. Regiões separadas por gradiente pouco intenso e por reduzidas fronteiras são fortes candidatas a serem unidas.

Numa segunda abordagem explora-se a distribuição espectral global das imagens. Essas técnicas têm base numa análise automática de histogramas: busca de picos e vales. Em geral, os picos correspondem a regiões homogêneas e os vales dos histogramas a limite entre classes. Os picos são então rotulados e segue a análise espacial para delimitação das áreas. Um dos precursores e mais famoso método baseado nesse princípio é o apresentado por Ohlander (1975).

Um terceiro grupo pode ser reconhecido na medida em que operam sobre a associação das duas técnicas anteriormente descritas. Por exemplo, num primeiro momento um grande número de segmentos de alta homogeneidade é identificado. Então a análise dos histogramas dos segmentos de alta homogeneidade confere consistência para agrupamentos maiores.

Também têm evoluído substancialmente os métodos mais complexos para delimitação de regiões homogêneas, efetivos para os casos onde as bordas das regiões não são tão marcantes, ou seja, onde não ocorrem altos gradientes. Dos consultados e testados no escopo desse trabalho salientam-se o *Mean Shift* e o dos Funcionais de Mumford-Shah.

Esses métodos tratam o problema da segmentação com uma extensão dos algoritmos de clusterização (agrupamento) ou ainda como um problema de minimização de funcionais de energia.

Shen (2005, 2006) e Liang et al (2004) apresentam soluções para uso do funcional de energia apresentado originalmente por Mumford e Shah (1989) e aproximado para o caso discreto com domínio em 2D (caso de imagens) por Chambolle(1999), cuja formulação remete a uma expressão do tipo:

$$F_g(u, K_u) = \gamma \iint_{\Omega} (u - g)^2 dx dy + \beta \iint_{\Omega \setminus K_u} |\nabla u|^2 dx dy + \alpha \mathcal{H}^1(K_u) \quad (16)$$

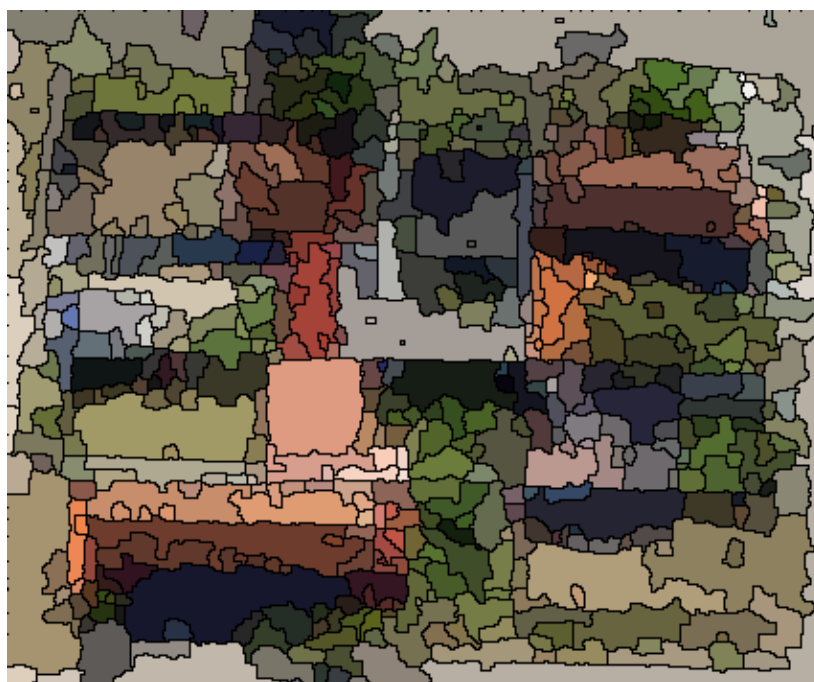
Na expressão, g é a imagem original, u é a segmentada e K_u são suas regiões homogeneizadas. As constantes γ , β e α são obtidas experimentalmente. Ω é o domínio das imagens. ∇u é o gradiente nas fronteiras das regiões delimitadas e H^1 é a dimensão Hausdorff para um espaço unidimensional.

Embora de análise bastante complexa e solução não trivial, esse funcional descreve de forma precisa o problema da segmentação, do ponto de vista da otimização do processamento de sinais. Parte-se da premissa de que sobre uma imagem existem contornos que delimitam regiões cujas propriedades são constantes (correspondentes a objetos do mundo real), mas não se apresentam como constantes nos valores dos píxeis da imagem devido o processo de obtenção da mesma. Minimizar o funcional F_g é encontrar um conjunto dessas regiões otimizado segundo critérios de fidelidade (primeiro termo do funcional), regularidade (segundo termo) e continuidade (terceiro e último termo).

O primeiro termo da Eq. 16 penaliza regiões onde os valores dos píxeis afastam-se da média da região; o segundo termo penaliza contornos muito recortados e muito longo; o terceiro termo penaliza descontinuidades no interior da região.

Resolver computacionalmente esse problema ainda é um desafio, porém boas aproximações tem sido propostas pelos autores citados, com destaque para Liang (2004), cujo algoritmo foi testado. O custo computacional é muito alto e não se obteve convergência em alguns dos casos. Na Figura 23 tem-se um dos resultados obtidos, numa situação de clara hipersegmentação. Outras configurações de parâmetros levam a resultados significativamente diversos.

FIGURA 23. IMAGEM DA FIGURA 21 SEGMENTADA POR ALGORITMO ADAPTADO DO MÉTODO DE MUNFORD E SHAH (1989)



O Método *Mean Shift* foi originalmente apresentado por Fukunaga e Hostetler (1975) como um método de clusterização e classificação não-supervisionado. Recentemente experimentos foram realizados por Machado

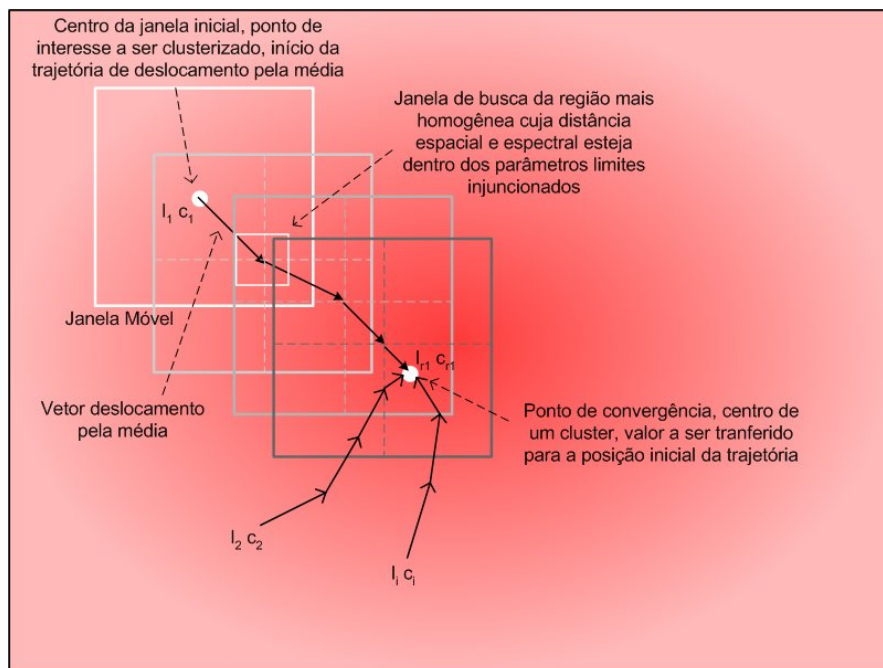
(2006), também para segmentação de imagens coloridas como as aqui utilizadas. Considere-se um funcional de energia mais simples, onde somente a penalidade por fidelidade está expressa. Ou seja:

$$J = \sum_i w_i d_i(x) \quad (17)$$

J é a chamada energia do sistema e deve ser minimizada com algumas injunções de vizinhança. A distância $d(x)$ é medida entre o valor do píxel no espaço das cores $f(x)$ e $c_i(x)$, a cor média estimada para um i -ésimo cluster; x é a posição do píxel no espaço imagem e w é um ponderador. Se nada está a priori determinado, nem o número de regiões, deve-se fazer estimativas para todos os parâmetros.

O método Mean Shift (deslocamento pela média) é um processo iterativo que resolve esse funcional aplicando ao valor de cada ponto da imagem um deslocamento na direção da média da região homogênea espectralmente mais próxima e dentro de uma determinada vizinhança. Ou seja, são levados em consideração a coerência nos domínios espectral e espacial para composição do resultado final. A Figura 24 ilustra como deve funcionar o algoritmo Mean Shift.

FIGURA 24. PRINCÍPIO DO ALGORITMO DE SEGMENTAÇÃO *MEAN SHIFT*.



Partindo de um ponto (l_1, c_1) da imagem e aplicando sucessivos deslocamentos, calculados por estimativas da função densidade de probabilidade multivariada e de seu gradiente, ocorre a convergência sobre o ponto (l_{r1}, c_{r1}) . Partindo do ponto (l_2, c_2) também ocorre a convergência sobre (l_{r1}, c_{r1}) . Outros pontos próximos provavelmente convergirão para (l_{r1}, c_{r1}) , uma vez que ele representa o centro de uma região mais homogênea. Todos esses receberão então os mesmos atributos de cores de (l_{r1}, c_{r1}) , tornando-se esse o centro de um cluster, ou como sugerido, o centro espectral da região r_1 . Esse processo será repetido para todos os pontos e ao final, serão preservadas somente as cores dominantes da imagem.

É interessante observar que esse algoritmo segue sentido oposto ao conhecido método do crescimento de regiões, onde um determinado número de clusters ou pontos-semente são escolhidos a priori em função dos histogramas das imagens e posteriormente os píxeis vizinhos com propriedades espectrais compatíveis vão sendo iterativamente agregados. Aqui o processo inicia em cada ponto da imagem para chegar nos centros de clusters que ainda não são conhecidos.

O cerne do algoritmo, evidentemente, é o cálculo do vetor deslocamento, tanto no domínio espacial quanto no domínio espectral. Adota-se a técnica de estimativa por máscara de convolução (na literatura de processamento de imagens conhecida como kernel). Detalhes desse procedimento podem ser vistos em Cheng (1995) ou Comaniciu e Meer(2002).

Basicamente o estimador multivariado da função densidade de probabilidade da variável independente x em um espaço euclidiano multidimensional é definido como:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (18)$$

onde n é o tamanho da amostra, h é a banda de passagem promovida pelo tamanho da máscara e d é a dimensão do espaço. K é o kernel considerado.

O gradiente dessa função diferenciável vale:

$$\hat{\nabla}f(x) \equiv \nabla\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n \nabla K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (19)$$

O kernel considerado ótimo para essas estimativas é o de Epanechnikov:

$$K_E(X) = \begin{cases} \frac{(d+2)(1-X^T X)}{2c_d} & \text{se } X^T X < 1 \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (20)$$

O termo c_d é o volume da hiperesfera com raio unitário. K , quando substituído na equação do gradiente (Eq. 19), resulta

$$\hat{\nabla}f(x) = \frac{n_x}{n(h^d c_d)} \frac{(d+2)}{h^2} \left(\frac{1}{n_x} \sum_{x_i \in S_h(x)} (x_i - x) \right) \quad (21)$$

O último termo de Eq. 21 é conhecido como o vetor deslocamento pela média. Levado, então, ao lado esquerdo dessa equação e simplificado:

$$M_h(x) = \frac{h^2}{(d+2)} \frac{\hat{\nabla}f(x)}{\hat{f}(x)} \quad (22)$$

Essa é a estimativa procurada, porém, para sua aplicabilidade uma heurística será importante. Uma imagem possui dois domínios independentes. O domínio espacial bidimensional (coordenadas linhas, colunas ou x, y) e o domínio espectral que para imagens em tons de cinza é unidimensional; para imagens coloridas tridimensional; e para imagens de sensores multiespectrais, multidimensional. A natureza desses domínios é

evidentemente diversa. As grandezas envolvidas nos dois domínios não são fisicamente homogêneas.

Por isso, e por facilidade computacional, o kernel e, por consequência, o vetor deslocamento é decomposto em duas componentes, uma para cada domínio. Então, para cada iteração haverá um vetor deslocamento espacial que desloca o kernel do ponto inicial para algum ponto vizinho, coerente com a banda de passagem espacial e para uma nova coordenada espectral, mais próxima da média da região mais homogênea dentro da banda de passagem espectral. Comaniciu (2002) prova a convergência desse processo.

A implementação testada para esse algoritmo foi adaptada da disponibilizada pelo próprio autor em seu URL (Cominiciu, 2006).

Os resultados que serão apresentados na seqüência e uma observação mais atenta do processo que está ocorrendo na imagem e de seu embasamento teórico remete a conclusão de que esse método e o citado método de suavização com preservação de bordas possuem algumas equivalências. Isso concorda com uma corrente interpretação da segmentação como processo baseado unicamente no conhecimento do sinal presente na imagem. Segundo esse entendimento a segmentação assim executada é essencialmente uma redução controlada da informação original, semelhante a uma suavização.

Para a realização dos objetivos aqui propostos os resultados obtidos pela segmentação utilizando *Mean Shift* foram considerados suficientes e a Figura 25 apresenta a imagem da Figura 21 segmentada com *Mean Shift*, com valores de raio de busca igual a 150 píxeis e sendo desprezadas todas as regiões com menos de 75 píxeis, que resultam incorporadas a seus vizinhos mais próximos por critério de verossimilhança.

FIGURA 25. SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM DA FIGURA 21 (NO DETALHE A ESQUERDA) UTILIZANDO O ALGORITMO MEAN SHIFT.



3.2.4. Operadores Morfológicos

Os objetos resultantes do processo de segmentação comumente apresentarão bordas recortadas, irregulares, endentadas, com pequenas concavidades. Também será freqüente a presença de pequenas áreas segmentadas totalmente contidas em áreas maiores. Essas características, na maior parte das vezes, são relacionadas a variáveis que alteram o processo de imageamento e não à realidade dos objetos construídos pelo homem nos espaços urbanos, onde formas euclidianas e lineares predominam. São resultantes de sombras, de mudanças na textura dos telhados devidos a calhas e a platibandas, a presença de antenas, de caixas d'água, as trocas de telhas quebradas, a presença de vegetais briófitos como musgo, que as pessoas normalmente confundem com limo (um vegetal do tipo alga que aparece em cursos d'água doce). Todos esses elementos representam casos que devem ser seletiva e conscientemente considerados ruídos no sinal a ser analisado, no caso a forma simplificada das edificações, alvos do interesse aqui descrito.

Mesmo quando aparecem devido à presença de elementos outros, como no exemplo dos telhados, as chaminés, as clarabóias, os pequenos poços de ventilação e iluminação e detalhes arquitetônicos estéticos, consideram-se tais desvios da regularidade não significativos, pois o objetivo é determinar similaridade com formas pré-determinadas.

Uma das ferramentas mais robustas e eficientes para simplificar objetos representados como imagens binárias matriciais é a morfologia matemática. Facon (1996) define a morfologia matemática como o estudo da estrutura geométrica das entidades presentes numa imagem; aqui imagem sendo o modelo matemático dos objetos do mundo real. Ele cita que a morfologia matemática “representa um ramo do processamento não linear que permite processar imagens com objetivo de realce, segmentação, detecção de bordas, esqueletização, análise de formas ...”. Conforme descrito depreende-se o quanto potente é tal ferramenta.

No âmbito da simplificação das formas, como será abordado, serão explorados apenas recursos da fundamentação da técnica, mais especificamente os conceitos de dilatação, erosão, abertura e fechamento de imagens.

A base de todo o processo é o elemento estruturante, uma pequena imagem, com uma forma básica, binária que será feita navegar sobre toda a imagem em análise, ocupando píxel a píxel todas as posições possíveis em seu domínio. Observe-se o exemplo da Figura 26.

O elemento estruturante (EE) é uma matriz de 11×11 pontos com forma aproximada de um círculo. O píxel central dessa pequena imagem será considerado a referência de EE.

Considere-se inicialmente que EE seja posto na posição do extremo superior esquerdo da Imagem (I). Agora verifique-se se em todas as posições onde EE é relevante ($EE = 1$) há ponto do conjunto objeto na imagem ($I=1$). Se essa condição é verdadeira o ponto de I correspondente a posição da referência de EE é feito igual a unidade. Caso contrário $I = 0$. A janela então é deslocada um píxel para a direita e o teste repetido; e assim sucessiva e iterativamente até que todos os pontos de I tenham sido verificados. Como se

percebe essa é uma operação similar aos filtros no domínio espacial por kernels, conforme já abordado. Ao final resultará uma imagem com objeto menor e mais simples que o original, por isso essa operação é dita erosão por morfologia. A Figura 27 ilustra a erosão da imagem da Figura 26 pelo elemento estruturante apresentado. A área branca é o objeto resultante. Em cinza a área erodida.

Uma operação inversa, conhecida como dilatação também pode ser definida nas mesmas bases. Apenas considere-se que o teste a ser efetuado seja alterado. Verifica-se se em pelo menos uma posição onde EE é relevante ($EE = 1$) há um ponto do conjunto objeto na imagem ($I=1$). Se essa condição é verdadeira o ponto referência na imagem resultante é feito igual a unidade. Caso contrário é feito nulo. O resultado será um objeto crescido na imagem, porém com borda mais uniforme. A Figura 28 ilustra o processo. Em cinza a área dilatada, assim o objeto resultante compreenderia essa região mais a área branca. O fundo está em preto.

FIGURA 26. EXEMPLO DE IMAGEM BINÁRIA COM UM OBJETO E O ELEMENTO ESTRUTURANTE PARA AS OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS

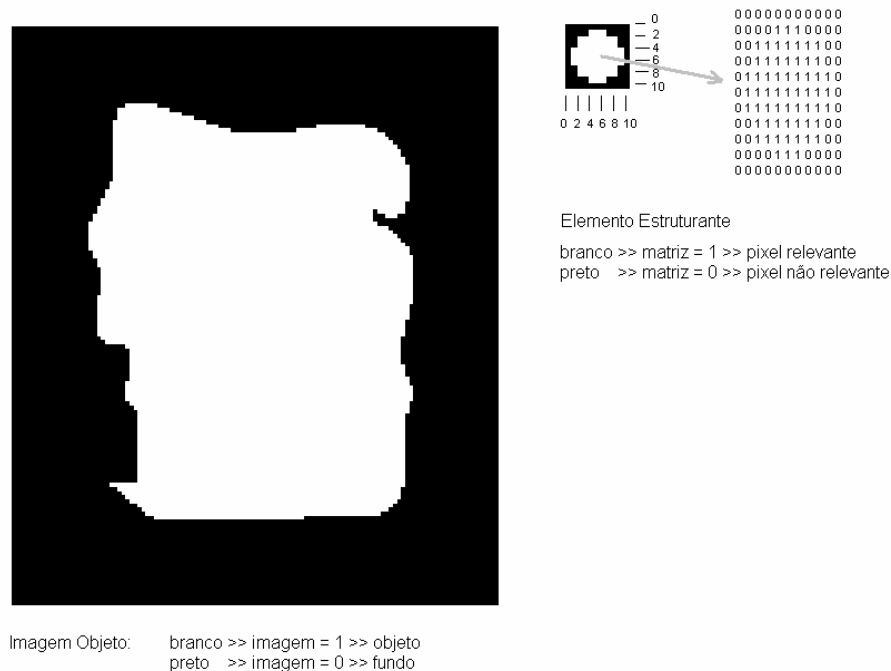


FIGURA 27. EROSAÇÃO DO OBJETO DA FIGURA 26 PELO ELEMENTO ESTRUTURANTE CIRCULAR 11X11.



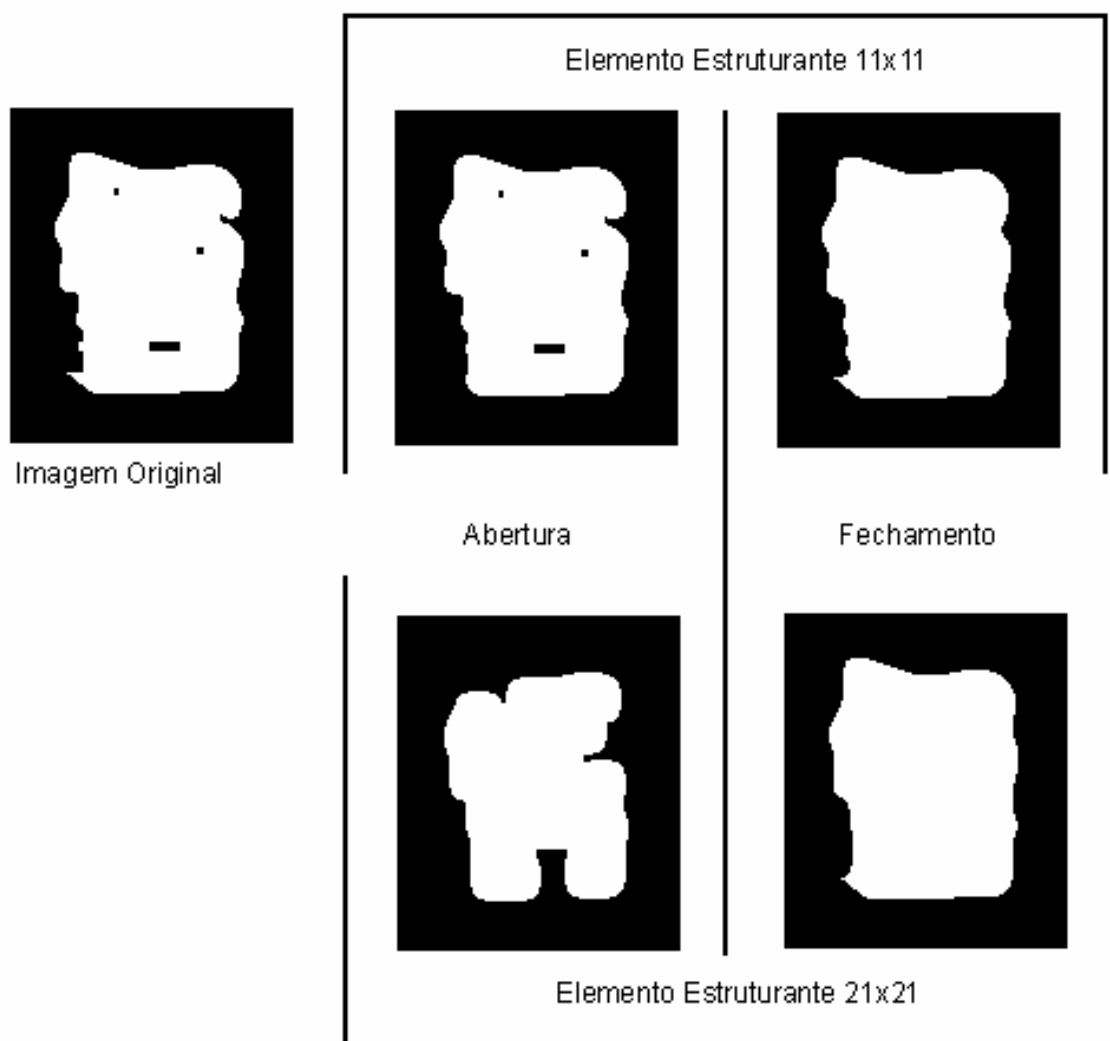
FIGURA 28. DILATAÇÃO DO OBJETO DA FIGURA 26 PELO ELEMENTO ESTRUTURANTE CIRCULAR 11X11.



Embora apresentem resultados que simplificam os contornos esses operadores reduzem ou aumentam significativamente os objetos em análise. Assim, é sugestiva e relativamente óbvia a alternativa de aplicar um após o outro, seqüencialmente, em operações que possuem denominações muito particulares. Chama-se abertura da imagem a aplicação de uma erosão

seguida da dilatação e fechamento da imagem o processo inverso. Essas denominações estão relacionadas ao comportamento da imagem no caso da presença de um objeto composto de duas áreas com uma tênue ligação entre elas. O primeiro procedimento tende a gerar dois objetos ao final, ou seja, promovendo a abertura desse tipo de estrutura. O fechamento, ao contrário, tende a consolidar a ligação, mantendo a estrutura de um único objeto. Além disso, no caso de vazios no interior do objeto a abertura tende a mantê-los e aumentá-los, enquanto o fechamento tende a eliminá-los, desde que sejam menores que o elemento estruturante. Observe-se a Figura 29.

FIGURA 29. O RESULTADO DA ABERTURA E DO FECHAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS POR ELEMENTOS ESTRUTURANTES DE DOIS TAMANHOS



Como se nota, a escolha do tamanho e da forma do elemento estruturante tem importante influência no resultado e tais parâmetros devem ser cuidadosamente escolhidos de acordo com o interesse do processamento. Uma outra observação interessante diz respeito à técnica de implementação do algoritmo para resolver as operações de morfologia matemática. Embora de descrição bem mais simples implementar a dilatação e a erosão binária como um processo de varredura pelo elemento estruturante trás um alto custo computacional. A implementação mais adequada desses conceitos passa pelo uso da soma e subtração de Minkowski, onde são exploradas as operações de união e intersecção de conjuntos e que no caso de imagens binárias transformam-se nos meros operadores da lógica booleana *and* e *or*. Mais detalhes sobre esse aspecto podem ser vistos também em Facon(1996) que cita Banon e Barrera (1994).

3.2.5. Classificação orientada aos objetos

A segmentação das imagens, como aqui apresentada, objetiva detectar regiões homogêneas na imagem, segundo critérios de conexão. Na linguagem computacional dois píxeis são considerados conexos quando além de contíguos possuem, segundo determinado critério, alguma propriedade comum, normalmente associada à informação que provê, como tom de cinza, cor ou assinatura espectral. Esses agrupamentos resultantes são considerados objetos na imagem, ainda não associados aos reais objetos do domínio da cena, como já se comentou no item relativo aos modelos de análise de imagens.

A classificação de imagens é uma técnica associada ao reconhecimento de padrões nas imagens que reproduz uma das principais qualidades do sistema visual humano: categorizar espacialmente os objetos observados segundo suas cores, forma e texturas. Assim, cada píxel da imagem é associado a uma classe de um número finito de classes eleitas *a priori*, ou

seja, é dito como pertencente a determinada categoria em função de suas propriedades.

Existem muitos métodos de classificação, que adotam metodologias matemáticas e computacionais das mais diversas. Em um grupo dessas metodologias o processo costuma ser executado em duas fases: o treinamento e a classificação propriamente dita. Numa fase preliminar de treinamento são estabelecidos os critérios segundo os quais os padrões serão reconhecidos. Na classificação esses critérios serão utilizados segundo determinada regra de decisão.

O treinamento pode ser supervisionado ou não supervisionado. No treinamento supervisionado o observador humano delimita amostras das classes e suas propriedades podem ser então estimadas. No processo não supervisionado de treinamento técnicas de automatização baseadas no comportamento de histogramas e/ou na clusterização são utilizadas com esse intuito. Fato é que ao final do treinamento estarão disponíveis um determinado número de classes devidamente caracterizadas em relação aos valores dos píxeis que as identifica. Esse conjunto métrico de características é conhecido como assinaturas de classes.

As regras de decisão utilizadas no processo de classificação podem ser paramétricas ou não paramétricas. Basicamente pode-se dizer que as regras paramétricas estão no domínio estatístico. Assim, parâmetros associados aos próprios dados serão utilizados na função de decisão, como média, variância e covariância. Nas regras não paramétricas as funções de decisão não têm relação com os dados e são impostas por outras injunções.

Por exemplo, seja o problema de localizar a vegetação numa imagem. Uma regra de decisão paramétrica exige que se conheça média e variância dos valores da imagem onde há evidências da presença de tal classe e a determinação é feita com base nesses parâmetros da estimativa da probabilidade de que qualquer outro píxel pertença a essa classe. Numa abordagem não paramétrica seria escolhido um valor no espaço de cores para verde, delimitada uma tolerância em torno dessa coordenadas de cores

e uma decisão pode ser tomada: está dentro da tolerância é vegetação; não está, não é!

As descritas metodologias de classificação podem ser aplicadas aos objetos segmentados nas imagens como alternativa ao processo clássico onde cada píxel, individualmente, é o alvo da atenção. Esse método parece estar mais próximo do que ocorre na interpretação de uma imagem pelo cérebro do homem e é conhecido como classificação orientada ao objeto. Nesse caso o processo cognitivo pode ser imitado inclusive com uso de outros parâmetros além dos espectrais, podendo-se explorar textura e forma para interpretação dos objetos da imagem.

No escopo desse estudo opta-se por utilizar uma técnica supervisionada de classificação orientada ao objeto com regra de decisão paramétrica.

Um conjunto de classes típicas dos ambientes urbanos e presentes nas imagens aerofotográficas de alta resolução devem possuir suas assinaturas conhecidas. Trata-se de registrar média e covariância dos valores dos objetos pertencentes a cada classe em determinado espaço de cores, ou seja, estimativas de parâmetros para os materiais de construção mais comuns utilizados em telhados e pavimentos, diversos tipos de vegetação (árvores, arbustos, gramíneas), água de piscinas, solos e sombra.

Então cabe aplicar as clássicas expressões da mínima distância euclidiana, da distância de Mahalanobis e/ou da máxima verossimilhança para determinar o quanto os objetos segmentados podem ser categorizados nas classes indicadas.

A métrica mais simples adota a distância euclidiana, baseada em:

$$D_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_{ci} - X_i)^2} \quad (23)$$

onde, D_c é a distância espectral de uma região a uma determinada classe c , n o número de bandas da imagem e X_i o valor da média da banda i na região considerada.

Essa distância considera que as variâncias das diversas classes são as mesmas, o que na maioria das vezes não é verdadeiro. Assim pode ser mais eficiente utilizar a distância de Mahalanobis, também de uso trivial nos processos de classificação, que pondera a distância pela matriz covariância de cada classe, definida como:

$$D = (X - M_c) \cdot Cov_c^{-1} \cdot (X - M_c)^t \quad (24)$$

onde X é o vetor com as componentes de informação de cor das regiões e M_c e Cov_c , respectivamente, o vetor média e a matriz covariância de cada classe.

Um formato mais completo para o cálculo dessa distância espectral está baseado na estimativa bayesiana, quando valores de probabilidade da preponderância de uma classe sobre a outra está disponível e é assumida a hipótese de que o histograma dos valores de cada banda em cada classe possui distribuição normal. Quando não se sabe o quanto uma classe deve ser considerada dominante consideram-se todas as probabilidades de classe iguais a unidade na expressão abaixo:

$$D = \ln(p_c) - [0,5 \ln(\|Cov_c\|)] - [(X - M_c)' \cdot Cov_c^{-1} \cdot (X - M_c)] \quad (25)$$

onde p_c é essa probabilidade, e os demais elementos são como já definidos acima. Essa expressão é classicamente identificada como distância por máxima verossimilhança.

Evidentemente, uma região será classificada como pertencente à classe onde a distância euclidana ou de Mahalanobis for mínima ou onde a probabilidade da expressão de verossimilhança for máxima.

Outros métodos de classificação estão sendo fartamente referenciados e utilizados atualmente e fundamentam-se em técnicas de inteligência artificial, como lógica *fuzzy* e redes neurais. Aqui não foram explorados, pois a classificação das regiões é uma fase preliminar do reconhecimento e não

necessita de alta acurácia, além de estar fora dos objetivos delimitados o estudo da otimização da classificação.

Um breve exemplo será aqui explorado com a finalidade de ilustrar os conceitos acima. Seja um recorte de uma imagem aerofotográfica digital, sua segmentação (conforme a Figura 30) e uma tabela de assinaturas conhecidas, tendo sido amostradas do mosaico do mesmo levantamento (Tabela 7). Recortadas algumas parcelas da imagem segmentada e aplicada uma classificação por máxima verossimilhança segundo as classes oferecidas e o resultado pode ser apreciado no detalhe da mesma Figura 30.

Há uma ótima concordância com a interpretação visual da cena, embora no segundo lote esteja evidente a extrapolação da área do telhado para uma região onde o pavimento possui uma cor bastante parecida. Esse tipo de equívoco no entanto somente poderá ser verificado na medida em que outro parâmetro seja agregado ao processo de classificação, como a altura do objeto sobre o solo. Isso será mais tarde abordado, quando da descrição da metodologia.

FIGURA 30. CLASSIFICAÇÃO POR MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA.

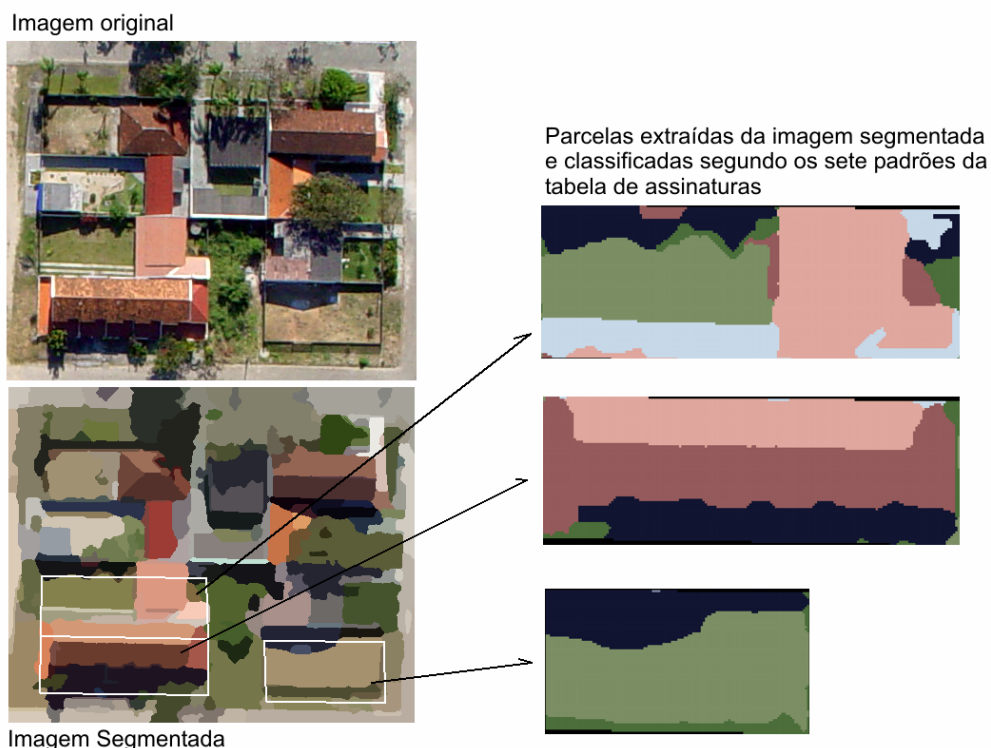


TABELA 7. ASSINATURAS ESPECTRAIS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO

		BANDA	MIN	MAX	MED	DESV	MATRIZ COVARIÂNCIA		
Telha Cimento Amianto		R	75	173	121,6	27,5	755,6	763,9	748,8
		G	69	173	116,7	28,3	763,9	798,9	772,0
		B	72	176	118,5	27,9	748,8	772,0	777,9
Telha Barro Clara		R	159	255	217,5	16,2	260,9	263,7	207,4
		G	80	196	148,4	18,8	263,7	352,6	266,1
		B	65	151	117,1	17,2	207,4	266,1	295,3
Telha Barro Escura		R	63	218	145,0	44,5	1978,2	934,1	380,6
		G	37	130	78,0	27,3	934,1	744,6	375,8
		B	33	118	60,9	16,2	380,6	375,8	262,6
Sombras		R	0	43	17,8	10,4	107,3	46,6	108,2
		G	0	50	16,3	12,5	46,6	155,8	135,5
		B	0	67	28,3	14,9	108,2	135,5	221,4
Vegetação árvores		R	0	127	73,6	22,2	493,2	304,3	358,9
		G	28	146	94,4	20,0	304,3	398,0	243,6
		B	0	83	36,0	19,6	358,9	243,6	382,4
Vegetação grama		R	66	153	120,7	15,8	248,7	109,3	167,4
		G	100	147	125,8	8,2	109,3	67,3	89,5
		B	28	99	67,6	12,9	167,4	89,5	166,6
Pavimentos Cimentados		R	157	246	197,2	19,5	381,3	335,1	331,2
		G	163	232	190,1	17,9	335,1	320,9	325,2
		B	150	223	178,9	18,7	331,2	325,2	349,5

3.2.6. Transformação nos Sistemas de Espaços de Cores

As imagens obtidas por processo aerofotográfico que se destinam ao uso métrico-cartográfico podem ser acromáticas ou coloridas, conforme a qualidade do sensor que as obtém.

Assim, no seu processamento, deve-se atentar para algoritmos capazes de tratar ambos os tipos de imagens ou para dois grupos de algoritmos que tratem cada tipo distintamente. Há, pois, uma decisão a ser tomada no fluxo da informação pelo sistema de processamento e análise.

No que se refere às imagens acromáticas, em tons de cinza, o processamento restringe-se a manipulações de brilho, contraste, equalização de histogramas, aplicação de suavizadores que preservem altos gradientes e ao teste de algoritmos de segmentação. Porém, em relação às imagens coloridas algumas questões devem necessariamente ser abordadas. Questões que estão ligadas aos fundamentos das imagens coloridas e serão resumidamente aqui apresentadas.

Um dos principais objetos de pesquisa na análise de imagens fotográficas é a cor. Há razões óbvias para isso: o homem percebe os objetos do mundo real em cores; o homem constrói dispositivos que registram esses objetos em imagens que simulam seu mundo colorido. Assim, se na aquisição da informação a cor é elemento fundamental, também é de se esperar que na análise das imagens procedimentos que quantifiquem a influência da cor no reconhecimento de padrões também o sejam.

Uma breve leitura de textos que formam a base da chamada Ciência das Cores (Color Science) revela importantes paralelos historicamente traçados entre a física da radiação luminosa, a fisiologia do olho humano, elementos da neurociência como a psicopercepção e, nas últimas décadas, a computação gráfica. A complexidade do tema e muitos dos seus pormenores podem ser revisados em textos como Gershon (1985), Foley (1990 e 1997), Green (1999), Byrne (2005), *site* do CIE (2006), *site* da HyperPhysics (2006), este último com material didático muito bem ilustrado e pertencente a página da Georgia State University. Em relação ao CIE (Commission

Internationale de l'Eclairage), instituição internacional responsável pelo estabelecimento de padrões de nomenclatura e de referenciais de cores, recomenda-se para aprofundamento os seguintes TRs (CIE Technical Reports) 118-1995 CIE Collection in Colour and Vision, 135-1999 Vision and Colour, Physical Measurement of Light and Radiation e 166-2005 Cognitive Colour e, também, as normas conjuntas CIE/ISO que podem ser conhecidas no Site do CIE (2006).

No âmbito desse estudo essa preocupação com processar imagens coloridas se traduziu, principalmente, com o cuidado em se escolher o espaço de cores onde a análise da imagem foi executada. Três espaços de cores diversos foram utilizados, a saber, o RGB, o Luv e a transformação de Ohta. Isso se justifica pois:

- o espaço RGB é aquele onde originalmente as imagens fotográficas são obtidas, portanto, inerente a qualquer processamento desse gênero.

- o espaço de cores de Ohta é conhecido por otimizar o desempenho dos segmentadores. Nos casos onde o objetivo principal seja explorar ao máximo a informação disponível na imagem, deve-se optar por um sistema de cores generalizado, correlacionado ao dispositivo e à qualidade do sinal por esse adquirido e serão justificáveis resultados diversos daquele obtido por um observador humano.

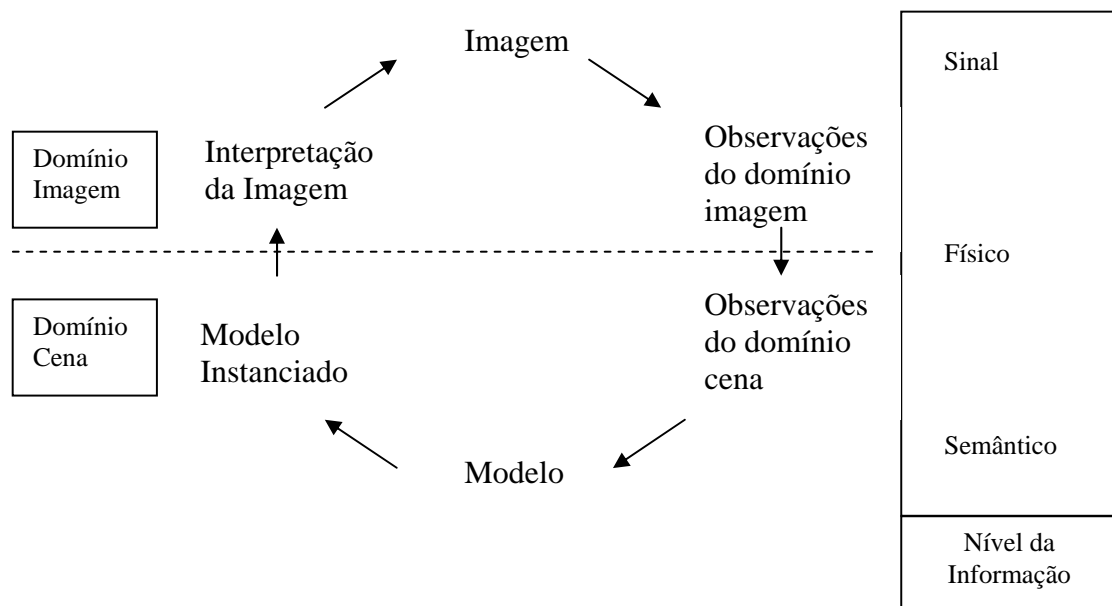
- o espaço de cores padronizado pelo CIE, conhecido como Luv, está intimamente ligado aos efeitos psicovisuais humanos. Ao se construir um sistema cuja pretensão seja obter um resultado o mais próximo possível ao que um observador humano obteria, em alguma fase do processamento (na classificação, por exemplo), fenômenos como o mismerismo poderão, ou deverão, ser levado em consideração. Ou seja, será importante utilizar esse sistema de referência na obtenção de coordenadas de cores que melhor reflitam a percepção humana dos objetos.

Mais informações sobre cores e transformações entre espaço de cores podem ser obtidas no anexo 3.

3.2.7. Interpretação das imagens

Uma das maiores autoridades na automação da interpretação de imagens, Takeo Kanade, autor ou co-autor de mais de 500 trabalhos publicados nos últimos 20 anos sobre o tema conhecido internacionalmente como *image understanding*, apresentou um modelo que inspirou a metodologia aqui adotada e mostrado na Figura 31.

FIGURA 31. DIAGRAMA LÓGICO DO MODELO DE ANÁLISE DE IMAGENS (KANADE, 1980)



Como se sabe a segmentação objetiva identificar nas imagens regiões com características similares, consistentes. Porém esse conceito de consistência é muito subjetivo.

A maioria dos algoritmos assume apenas que a variação intra-região é menor que a variação inter-região e então encontra limites para essas regiões. Porém, consideram somente o comportamento da propriedade sem levar em conta a razão desse comportamento. Esse gênero de consistência não costuma ser suficiente para reconhecimento automático de objetos nas imagens.

Segundo o modelo proposto, a meta da segmentação que conduz a interpretação da imagem, deve ser a separação semântica de objetos ou parte desses nas imagens. Assim, o conhecimento sobre as classes presentes nas imagens, sua organização e seu papel no contexto da cena são fundamentais. Diversas abordagens têm sido sugeridas para agregar tais informações na solução do problema, algumas gráfico-estruturais baseadas em grafos, outras lingüísticas, cuja descrição detalhada foge ao objetivo desse texto.

Fato é que a informação disponível para a interpretação de imagens deve estar uniformemente distribuída em três níveis: sinal, físico, semântico.

O sinal é o mais elementar nível da informação presente na imagem. É a cor, o tom de cinza, a textura, os gradientes e todas as propriedades 2D passíveis de manipulação a partir desses citados ou correlatos. O nível físico é uma ponte entre o domínio imagem e a cena. A partir do nível físico pode-se inferir heurísticas da formação da imagem e da recuperação da configuração 3D do mundo real. O nível semântico permite operar no domínio da cena e explorar as injunções do mundo real.

Dois domínios estão presentes. O sinal está no domínio imagem enquanto o nível de informação semântica está no domínio cena. Segmentos de reta, regiões homogêneas, gradientes de intensidade estão no domínio imagem. Por sua vez as configurações específicas de bordas (como cantos ou polígonos fechados), orientação de superfícies, propriedades radiométricas dos alvos estão no domínio da cena.

As unidades do domínio imagem são discretas e correspondem a contadores digitais e píxeis; no domínio cena são contínuas e métricas. Na linguagem fotogramétrica se diria espaço imagem e espaço objeto.

Um exemplo: o histograma de uma imagem mostra claras presenças multimodais. Os vales do histograma são normalmente tidos como limite de segmentação. Esse é um fenômeno ao nível de sinal. Esses são bons limites, pois é assumida a condição de que as modas correspondem a presença de superfícies com reflectâncias diversas ou orientações diversas, que geram duas regiões na imagem com tons de cinza diferentes, mas relativamente

constantes. Esse é o nível físico. Finalmente, nós sabemos que superfícies com diferentes reflectâncias ou orientações são semanticamente significantes e devem constituir objetos do nosso mundo real, ou parte deles. Esse é o nível semântico.

Esses conceitos podem então ser estendidos ao objeto da interpretação da imagem, conforme sugere a tabela 8.

TABELA 8. A META DA FASE DE SEGMENTAÇÃO NOS DIVERSOS DOMÍNIOS

Consistência em:	Meta	Exemplos
Características da imagem	Observações no domínio imagem	Regiões com cores similares dentro de determinado limite
Características da cena	Observações no domínio cena	Superfícies com orientações diversas
Significação semântica	Interpretação da imagem	Telhados das casas

A segmentação no nível de sinal, como já foi dito, é um pré-processamento para redução da informação contida na imagem, partindo-a em regiões. No nível físico é recuperar características em termos de superfícies. No domínio semântico é interpretar as correspondentes regiões em termos de significado do mundo real.

Acompanhando o ciclo de interpretação apresentado no modelo, desde a imagem, a segmentação resultará em observações no domínio imagem. A partir de injunções impostas pelo conhecimento *a priori* do que provavelmente esteja presente na cena, algumas das regiões podem ser classificadas gerando as observações no domínio da cena. Um primeiro modelo da cena pode ser composto com essas observações, formas geométricas e topologias serão estimadas, e instanciado tal modelo com parâmetros de validação. Uma primeira interpretação da cena pode ser gerada e uma imagem sintética produzida uma vez conhecidos os parâmetros do sensor que foi utilizado na obtenção da imagem. Técnicas de

correspondência podem operar para medir a compatibilidade dos elementos inicialmente identificados com a imagem original.

Esse é um processo iterativo. Um próximo ciclo pode ser reiniciado, agora já com alguns elementos da imagem interpretados, auxiliando o reconhecimento de outros objetos.

3.2.8. Máxima correlação cruzada

Duas imagens da mesma cena tomadas em diferentes circunstâncias: de posições ou em tempos distintos. A necessidade de automaticamente identificar objetos, feições ou pontos homólogos a fim de permitir inferências sobre sua posição, orientação, restituição tridimensional ou movimento. Esse o cenário que levou o desenvolvimento das técnicas de *matching* de imagens.

Dentre tantas alternativas disponíveis, conforme se pode conferir em Schenk (1997), a mais comum é a da correlação entre regiões. Basicamente, uma pequena área de uma das imagens, arbitrária ou propositalmente considerada referência, é extraída. Essa área é o padrão a ser reconhecido na outra imagem, aqui denominada matriz procurada, MP.

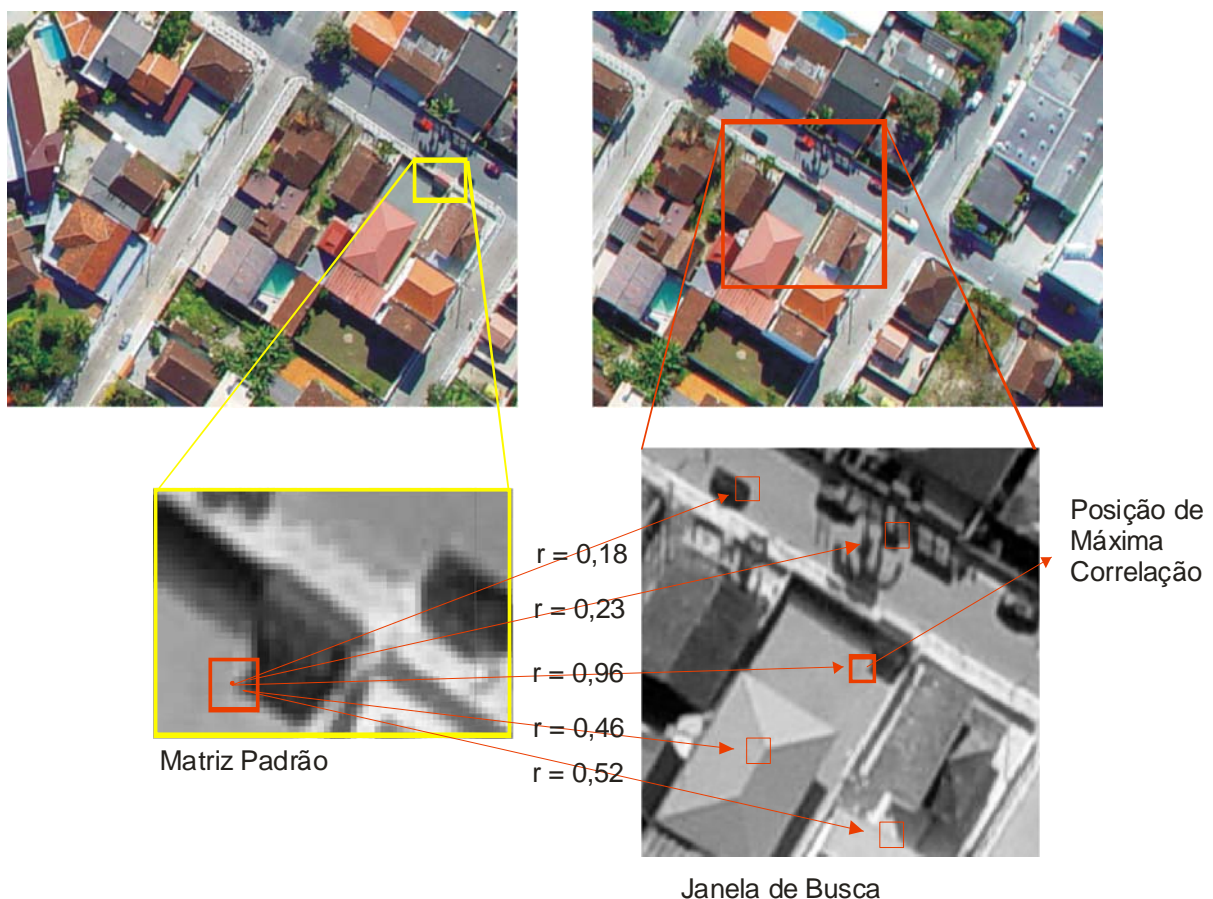
Na outra imagem, dita contra-referência, a região onde esse padrão provavelmente se encontra deve ser definida: uma janela de busca (JB). Evidentemente toda a contra-referência pode ser o alvo da busca, no entanto é desejável que algum tipo registro prévio aproximado esteja disponível para reduzir o custo computacional. O padrão MP então deve navegar espacialmente sobre JB, e para cada posição ocupada, o valor do coeficiente de correlação cruzada é calculado e armazenado em uma estrutura do tipo espaço de estado de JB. Em uma fase de pós-processamento, a posição onde o máximo dessa função correlação cruzada ocorre é a melhor estimativa da localização de MP em JB, como ilustra a Figura 32.

O coeficiente de correlação cruzada normalizada utilizado para a finalidade de comparar esses padrões é dado pela equação:

$$r = \frac{\sum_{i,j} [g_p(c_p, l_p) - \bar{g}_p] \cdot [g_b(c_b, l_b) - \bar{g}_b]}{\sqrt{\sum_{i,j} [g_p(c_p, l_p) - \bar{g}_p]^2 \cdot \sum_{i,j} [g_b(c_b, l_b) - \bar{g}_b]^2}} \quad (26)$$

Na expressão g é o valor da unidade armazenada no píxel (normalmente o tom de cinza), \bar{g} é o valor médio de todos os píxeis da janela e os índices p e b referem-se a MP ou JB, respectivamente.

FIGURA 32. MÉTODO DA MÁXIMA CORRELAÇÃO CRUZADA APLICADO AO PROBLEMA DA BUSCA DE PONTOS HOMÓLOGOS.



Esse método bastante simples possui restrições conhecidas: por vezes falsos correlatos são identificados. Uma série de aprimoramentos nesse

algoritmo são sugeridos para evitá-los, especialmente se destaca a técnica de rotulação por relaxação, como em Galo (2004 e 2005) . Na implementação utilizada nesse trabalho, no entanto, somente um limite de aceitabilidade do coeficiente de correlação ($r_{\min} = 0,75$) foi tido como suficiente. A justificativa para isso está relacionada à característica das imagens aqui utilizadas, bem orientadas e com espaços de busca bastante restritos, conforme será verificado na seqüência.

3.2.9. Câmara sintética

A representação gráfica de um objeto no ambiente computacional, em última instância, costuma ser sempre discreta como numa imagem, formada por uma matriz de píxeis. Isso, obviamente, devido às características dos principais dispositivos de visualização. No entanto, sempre que o objetivo é tentar construir nesses dispositivos a imagem de uma cena virtual, o modelo de representação é puramente analítico e vetorial. Com isso pode-se obter certo realismo, possibilidade de edição, animação e simulação.

Os objetos que compõem a cena devem ser modelados a partir de primitivas geométricas parametrizadas e de coordenadas tridimensionais referidas a um sistema compatível com o mundo real. Um observador será posicionado nesse mesmo sistema de coordenadas e terá seu vetor visão orientado. Uma fonte de iluminação com características físicas definidas pode ser inserida nesse universo virtual. As superfícies podem receber atributos que levem sua texturização, transparência, espelhamento e sombreamento no produto resultante. Finalmente uma projeção desses objetos sobre um plano arbitrário posicionado entre o observador e a cena leva à geração de uma imagem.

Essa é uma das principais aplicações da síntese de imagens. O ponto onde está o observador é um centro perspectivo e a uma distância conhecida encontra-se um plano de projeção. Atentamente, a típica configuração de uma tomada fotográfica, por isso caracteriza-se como uma câmara sintética; a Figura 33 é uma ilustração desse sistema.

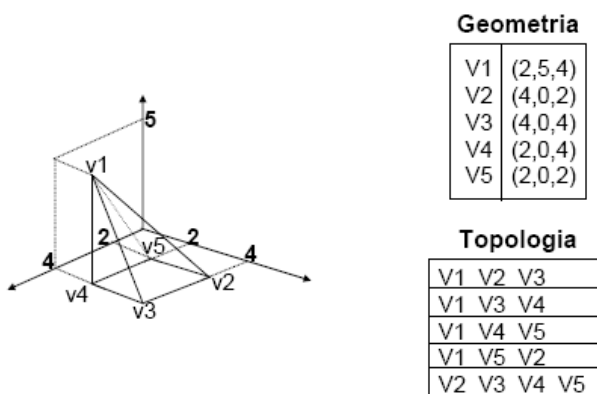
O conjunto das operações envolvidas nesse processo é composto, basicamente, da estruturação da base de dados dos objetos, de um conjunto de transformações de coordenadas e de uma série de modelos avançados que visam ao realismo. Essa última aqui não será abordada por não ser relevante ao objetivo da pesquisa.

FIGURA 33. ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE CÂMARA SINTÉTICA.
FONTE: D. BROGAN. UNIVERSIDADE DA VIRGÍNIA



A modelagem volumétrica dos objetos é comumente executada por uma malha de polígonos, como a Figura 34 sugere. Uma estrutura relacional armazena o índice e as coordenadas dos vértices. Uma outra armazena as faces poligonais, descrita por seus vértices segundo os respectivos índices.

FIGURA 34. MODELAGEM DE DADOS DE UM OBJETO TRIDIMENSIONAL.
FONTE (GRUPO C.G. – UFRGS)



Na visualização segundo uma câmara sintética, uma imagem será gerada sobre um dispositivo computacional, como um monitor. Determinar as coordenadas dos pontos nesse dispositivo que serão os vértices das linhas a serem exibidas para gerar um vista realista dos objetos modelados exige a aplicação encadeada de uma série de transformações de coordenadas. A Figura 35 ilustra essa conhecida *pipeline* de visualização:

Inicialmente, as coordenadas da estrutura de dados estão num definido sistema de referência de universo (SRU, XYZ). Esses pontos devem ter suas coordenadas calculadas em relação a um sistema de referência da câmara (SRC, xyz), também tridimensional, posicionado no centro projetivo e orientado conforme o eixo óptico da câmara. A Figura 36(a) mostra a configuração desses sistemas no caso homólogo da aerofotogrametria.

FIGURA 35. PIPELINE DE VISUALIZAÇÃO DE UM OBJETO 3D NUM DISPOSITIVO GRÁFICO COMPUTACIONAL.

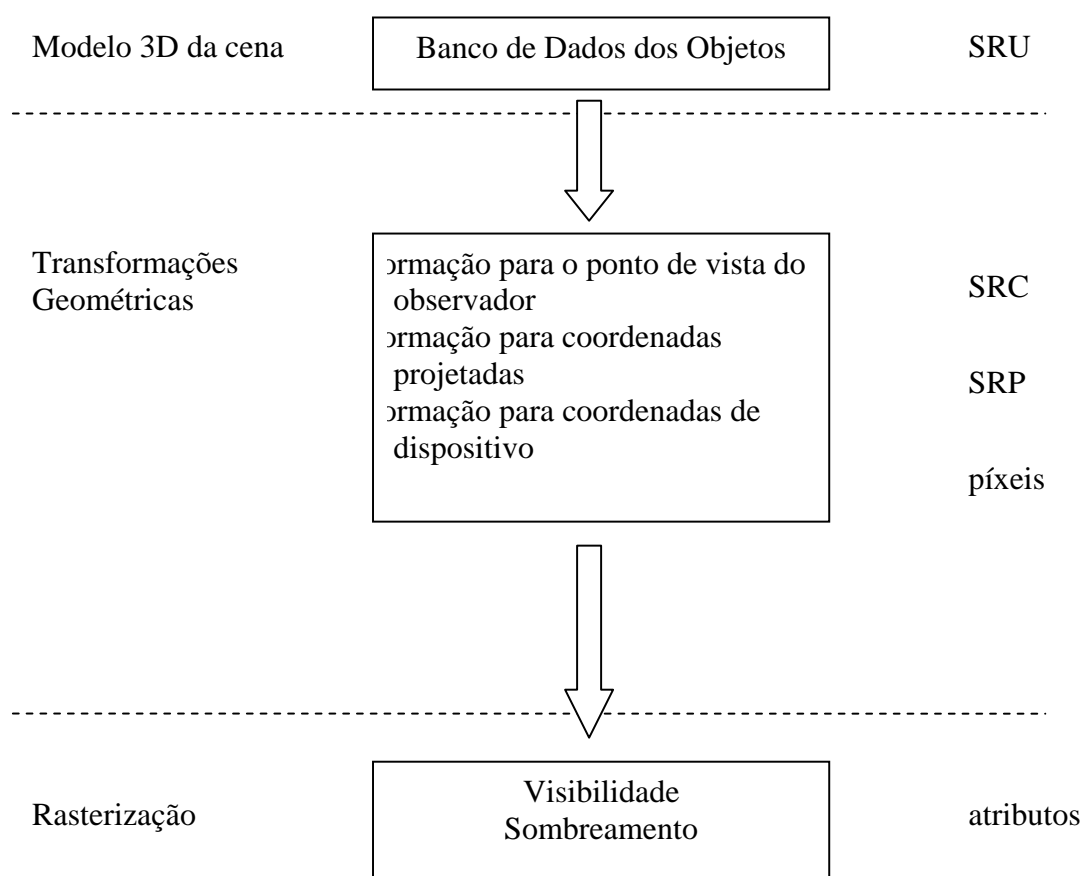
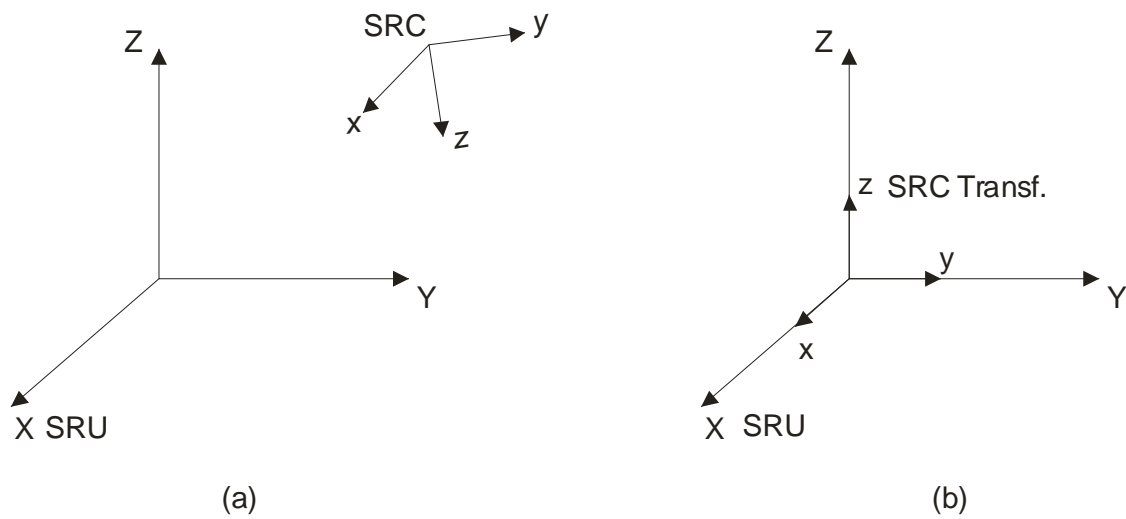


FIGURA 36. OS SISTEMAS DE REFERÊNCIA DA CÂMARA SINTÉTICA



A conversão das coordenadas do sistema SRU para SRC será efetuada mediante uma matriz de transformação. A aplicação dessa matriz também leva à orientação de SRC segundo SRU, conforme a Figura 36(b). Para isso cinco transformações parciais são necessárias:

- inversão do eixo z, pois o sistema SRC é levógiro e SRU é destrógiro.
- translação da origem de SRC para origem de SRU.
- rotação de SRC em torno de X para colocar x no plano XZ.
- rotação de SRC em torno de Y para alinhar x com X.
- rotação de SRC em torno de Z para fazer coincidir os sistemas.

A matriz transformação será o produto de uma matriz escala (a inversão é uma operação de escala cujo fator é -1), uma matriz translação para o centro perspectivo e três matrizes rotação, cujos parâmetros serão os ângulos de orientação exterior Ω , Φ e K , respectivamente.

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} T$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_o & Y_o & Z_o & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Omega) & \sin(\Omega) & 0 \\ 0 & -\sin(\Omega) & \cos(\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & 0 & -\sin(\Phi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\Phi) & 0 & \cos(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(K) & \sin(K) & 0 & 0 \\ -\sin(K) & \cos(K) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Efetuando o produto:

$$T = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ j & k & l & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$a = \cos \Phi \cdot \cos(K)$$

$$b = -\cos \Phi \cdot \text{sen}(K)$$

$$c = -\text{sen}(\Phi)$$

$$d = -\text{sen}(\Phi) \cdot \text{sen}(\Omega) \cdot \cos(K) + \cos(\Omega) \cdot \text{sen}(K)$$

$$e = -\text{sen}(\Phi) \cdot \text{sen}(K) \cdot \text{sen}(\Omega) + \cos(K) \cdot \cos(\Omega)$$

$$f = \cos(\Phi) \cdot \text{sen}(\Omega)$$

$$g = -\text{sen}(\Phi) \cdot \cos(\Omega) \cdot \cos(K) + \text{sen}(\Omega) \cdot \text{sen}(K)$$

$$h = \text{sen}(\Phi) \cdot \text{sen}(K) \cdot \cos(\Omega) + \cos(K) \cdot \text{sen}(\Omega)$$

$$i = -\cos(\Phi) \cdot \cos(\Omega)$$

$$j = \{Xo \cdot \cos(\Phi) + [Yo \cdot \sin(\Omega) + Zo \cdot \cos(\Omega)] \sin(\Phi)\} \cos(K) + [Yo \cdot \cos(\Omega) - Zo \cdot \sin(\Omega)] \sin(K)$$

$$k = -\{Xo \cdot \cos(\Phi) + [Yo \cdot \sin(\Omega) + Zo \cdot \cos(\Omega)] \sin(\Phi)\} \text{sen}(K) + [Yo \cdot \cos(\Omega) - Zo \cdot \sin(\Omega)] \cos(K)$$

$$l = -Zo \cdot \text{sen}(\Phi) + [Yo \cdot \text{sen}(\Omega) + Zo \cdot \cos(\Omega)] \cos(\Phi)$$

Calculadas as coordenadas dos vértices no SRC, a projeção sobre o plano imagem pode ser executada por:

$$\begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{f} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & \frac{z}{f} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Em todas as operações apresentadas, as coordenadas dos pontos são homogeneizadas, ou seja, um ponto cuja coordenada seja (X,Y,Z) será considerado para fins de manipulação pela formulação como (X,Y,Z, ε), onde ε é um fator de escala, originalmente feito igual à unidade. Porém, na aplicação da transformação perspectiva note-se que o fator de escala do ponto projetado calculado vale z/f . Para fazê-la voltar à unidade, todas as demais componentes devem ser divididas por essa escala, donde:

$$\begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & \frac{z}{f} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{f}{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x \cdot f}{z} & \frac{y \cdot f}{z} & f & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Ou seja, no plano, o ponto projetado terá coordenadas x_p, y_p , no sistema de referência da projeção. Evidentemente, a componente z da

coordenada do ponto vale f , pois o plano é perpendicular a z e essa é sua distância à origem de SRC.

As coordenadas x_p, y_p são métricas e estão no domínio real. Porém os dispositivos de visualização são discretos e possuem um sistema de referência onde os pontos são localizados por contagem de píxeis em linhas e colunas, com origem no ponto superior esquerdo do plano de projeção. Uma nova transformação deve então ser aplicada para obtenção dessas coordenadas de dispositivo. Essa última conversão é exatamente a inversa daquela fiducial-fotogramétrica utilizada na orientação interior da imagem fotográfica.

O último conjunto de tarefas citado no *pipeline* de visualização, referente à rasterização é um dos mais complexos. No entanto, a cena que será objeto dessa modelagem para utilização na pesquisa não exige elementos de realismo; tão somente a imagem de um objeto prismático simplificado e com faces opacas será projetada para comparação com a imagem fotográfica real, conforme se poderá conferir oportunamente.

Detalhes sobre coordenadas homogêneas e sobre as operações aqui apresentadas podem ser vistos em Foley (1990), ou em qualquer obra técnico-didática sobre computação gráfica.

Finalmente, é pertinente observar que sob duas linguagens distintas, a da computação gráfica e da fotogrametria, estão sendo representados os mesmo elementos físicos. O SRC representa com exatidão a orientação exterior do modelo fotogramétrico. A projeção sobre o plano imagem, por sua vez, traz claramente elementos da orientação interior. Os termos da matriz T guardam similaridade com os coeficientes da equação da colinearidade.

Em relação aos referenciais aqui citados, é importante lembrar que na síntese de imagens, os objetos são tridimensionalmente modelados no conhecido SRU. Podem, então, ser mapeados no SRC, depois projetados num SRP para, a seguir, serem descritos em coordenadas de dispositivo.

Na fotogrametria, os pontos lidos inicialmente na imagem, estão num referencial próprio desse espaço, denominado sistema de coordenadas de imagem. Passam a um sistema dito pseudofiducial e, em seguida, a um

referencial fotogramétrico. Projetados pela equação da colinearidade em direção ao espaço objeto e estarão computadas as coordenadas num referencial geodésico local. As equivalências entre os descritos sistemas referenciais são óbvias e muito úteis na implementação de algoritmos que integrem ou comparem informações dos dois domínios.

3.2.10. O efeito de sombreamento

Um importante elemento para o realismo na síntese de imagens é a presença de sombras. É uma evidência da tridimensionalidade dos objetos que aparecem projetados num plano congruente ao dos dispositivos gráficos onde as imagens são exibidas. Assim o estudo físico e a modelagem matemática desse fenômeno óptico têm sido bastante explorados pela computação gráfica.

Considere-se uma superfície sobre a qual incidem os feixes luminosos provenientes de determinada fonte de luz. A interação da radiação com a matéria que constitui essa superfície permite três tipos de fenômenos: a transmissão, a absorção e a reflexão. Na matéria translúcida, a transmissão é preponderante. Nos corpos negros, a absorção é máxima e o efeito de termalização ocorre. Nos corpos opacos, em geral, a parcela reflexiva é a mais importante e aquela associada ao nosso sentido da visão. A superfície aqui considerada é desse último tipo.

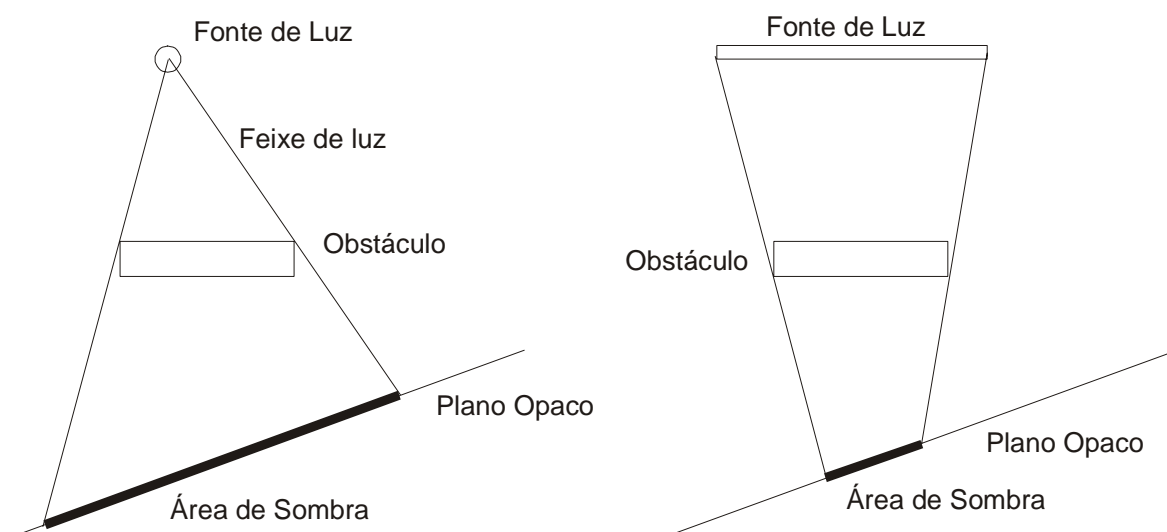
A constituição, a microrrugosidade, a textura e a orientação da superfície em relação à posição da fonte determinam as características dessa reflexão, estímulo à visão. A posição do ponto de vista e orientação do vetor visão do observador sobre a superfície determinam sua impressão do objeto.

Considere-se que um objeto seja interposto entre a fonte de luz e a superfície. Uma área da superfície não receberá a incidência direta dos feixes luminosos e a impressão visual do observador será de uma área escura: a sombra.

A sombra é, pois, a região de uma superfície obscurecida por um obstáculo. Considerando que o feixe luminoso se propaga em linha reta, a área da sombra será a projeção sobre a superfície dos feixes que partem da fonte e passam pelos pontos limites do objeto. A Figura 37 ilustra esse conceito bastante simples.

Embora o modelo idealizado represente bem o processo, ele não reproduz exatamente o que se observa no cotidiano. Nas cenas reais, dois fenômenos contribuem para iluminação parcial da área sombreada: a difração da luz nas bordas do objeto e o espalhamento pelos aerossóis presentes na atmosfera. Essa iluminação residual é conhecida como penumbra. Porém, dado que o objetivo principal aqui não é exatamente o realismo mas sim a previsão da área de sombra em determinada paisagem, o modelo simplificado torna-se suficiente.

FIGURA 37. MODELO SIMPLIFICADO DE PROJEÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE SOMBRA. A ESQUERDA FONTE PUNTIFORME. A DIREITA FONTE LINEAR.



Cabe ainda analisar as características da iluminação a que são sujeitas as paisagens registradas pelos sistemas aerofotogramétricos, ou seja, a iluminação solar. O sol é uma grande fonte luminosa, distante o suficiente da Terra para que seus feixes de luz cheguem a ela paralelos. Então a orientação do vetor iluminação depende da posição da superfície da Terra onde se deseja determinar a sombra, conforme ilustra a Figura 38.

Essa orientação pode ser determinada pela posição aparente do sol na abóbada celeste, por sua vez calculada segundo elementos da mecânica orbital.

FIGURA 38. MODELO DE SOMBRAS NO CASO DA ILUMINAÇÃO SOLAR
(FONTE: DEP. DE ASTRONOMIA DO INSTITUTO DE FÍSICA DA UFRGS)



Existem diversos modelos matemáticos para essa finalidade cujo grau de complexidade varia de acordo com a precisão e acurácia desejadas. Os melhores podem calcular ângulos com $\pm 0,0003$ graus de precisão para a posição solar no período do ano -2000 ao ano 6000, mas possuem alto custo de processamento e o uso de parâmetros astronômicos de difícil obtenção. Para previsão de sombras, valores de azimute e elevação da posição aparente do sol com precisão da ordem de grandeza do grau já serão suficientes, donde se optou por um modelo simplificado que trabalha com aproximação da ordem de um minuto para o tempo e despreza harmônicos superiores correspondentes aos efeitos de precessão e nutação da rotação da Terra e anomalias orbitais de longo período, conforme Reda e Andréas(2003).

Os dados para a estimativa são tempo e posição, quando e onde a sombra deve ser simulada, medidos em ano/mês/dia/hora/minuto e latitude/longitude locais.

Primeiramente uma coordenada angular da posição da Terra sobre sua órbita em torno do sol em relação ao ponto vernal é calculada como uma fração do ano em radianos por:

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \left(dia - 1 + \frac{hora - 12}{24} \right) \quad (31)$$

onde o dia contado no calendário Juliano (1º de janeiro = 1, 31 de dezembro = 365 ou 366). Com esse valor é possível determinar uma aproximação da declinação solar também em radianos:

$$decl = 0,006918 - 0,399912 \cos \gamma + 0,070257 \sen \gamma - 0,006758 \cos 2\gamma + 0,000907 \sen 2\gamma - 0,002697 \cos 3\gamma + 0,00148 \sen 3\gamma \quad (32)$$

e uma estimativa da hora solar verdadeira em minutos como:

$$eq = 229,18 \left(0,000075 + 0,001868 \cos \gamma - 0,032077 \sen \gamma - 0,014615 \cos 2\gamma - 0,040949 \sen 2\gamma \right) \\ horasolar = hora * 60 + minuto + eq - 4.longitude + 60 * timezone \quad (33)$$

Essa hora solar pode ser transformada em uma coordenada angular em graus segundo:

$$hsangular = \left(\frac{horasolar}{4} \right) - 180 \quad (34)$$

Finalmente, conhecidos todos os parâmetros necessários, a determinação aproximada da posição aparente do sol na abóbada celeste pode ser feita. Compatibilizando as unidades angulares vem:

$$\cos \phi = \sen(lat) \sen(decl) + \cos(lat) \cos(decl) \cos(hsangular) \quad (35)$$

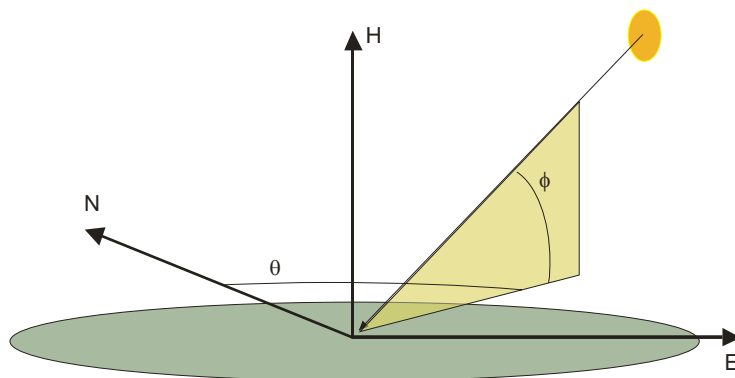
$$\cos(180 - \theta) = - \frac{\sen(lat) \cos \phi - \sen(decl)}{\cos(lat) \sen \phi} \quad (36)$$

Nessa expressão, ϕ é o ângulo zenital solar, medido em graus desde o horizonte local e θ é o azimuth solar, também medido em graus, no sentido horário desde o norte, como mostra a Figura 39.

Duas implementações de modelos mais precisos que executam esse cálculo foram utilizadas para conferir a qualidade dos dados obtidos. Uma

delas da NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration, Site da NOAA) e outra da Universidade do Oregon (Site da UOregon).

FIGURA 39. ÂNGULOS DE ORIENTAÇÃO DA ILUMINAÇÃO SOLAR



Conhecidos os ângulos de orientação do sol (vetor iluminação) resta projetar cada vértice das faces que compõem o objeto sobre o plano do terreno segundo essa direção. Esse é um exercício trivial de geometria analítica, rotina na computação gráfica.

3.2.11. A Distância de Hausdorff

Felix Hausdorff foi um matemático alemão cuja obra é referência obrigatória na chamada topologia moderna. Entre tantas contribuições que deixou às ciências matemáticas figuram as chamadas métricas entre conjuntos. Dessas, uma em especial tem ocupado espaço em publicações recentes envolvendo a comparação de imagens, reconhecimento de padrões e de formas: a distância de Hausdorff (HD).

O histórico das publicações sobre o uso da HD na visão computacional remonta experimentos realizados pelo renomado Vision Group da Cornell University (Nova York) liderado pelo Dr. Dan Huttenlocher. As mais expressivas publicações sobre o tema têm sua autoria ou participação, como em Huttenlocher (1990, 1991, 1992, 1993).

Originalmente HD é definida como:

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (37)$$

onde,

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \{\min_{b \in B} \{d(a, b)\}\} \quad (38)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \{\min_{a \in A} \{d(b, a)\}\} \quad (39)$$

onde $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ e $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ são dois conjuntos com número finito de pontos e d é uma métrica entre os dois conjuntos, por exemplo e aqui considerada, a distância euclidiana.

$h(A, B)$ é a distância de Hausdorff direta de A para B e $h(B, A)$, por analogia, a distância de Hausdorff direta de B para A . O significado dessas distâncias é simples e o algoritmo de sua determinação, a princípio, também é trivial:

- Toma-se um elemento de A e calcula-se a distância a todos os elementos de B , registrando o menor valor;
- Repete-se o passo anterior para os demais elementos de A ;
- Determina-se o maior valor registrado.

Ou seja, $h(A, B)$ é a maior das menores distâncias que separam os pontos de A para B ; $h(B, A)$ será determinada por processo idêntico, somente considerando sentido inverso para o computo das distâncias. É importante relembrar que as operação max-min não são simétricas, portanto devem ser orientadas, donde $h(A, B)$ pode, e normalmente, não será igual a $h(B, A)$.

HD será a maior entre as duas $h(A, B)$ e $h(B, A)$. A Figura 40 apresenta graficamente o conceito.

Evidentemente, para qualquer ponto tomado em um dos conjuntos haverá um ponto do outro conjunto afastado no máximo $H(A, B)$ e esse é o significado topológico da HD. Essa métrica possui uma propriedade muito importante para a aplicação na visão computacional: responde de maneira mais próxima à resposta intuitiva da visão humana acerca do afastamento de dois conjuntos no espaço euclidiano (Huttenlocher, 1990).

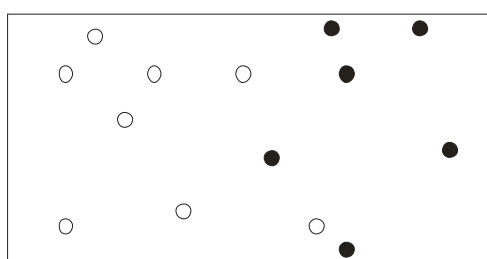
A aplicação dessa técnica na comparação de formas exige algumas generalizações, análise matemática e o uso de artifícios computacionais para

permitir viabilidade de bons resultados em tempo de processamento compatível. Além disso, uma série de alterações no conceito vêm sendo sugeridas para contemplar casos especiais.

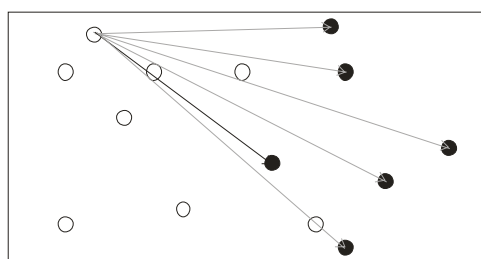
Duas são as abordagens dominantes: comparação de objetos vetoriais e comparação de imagens binárias.

Como citado no tópico referente à câmara sintética, na síntese de imagens os objetos são modelados por conjunto de vértices de polígonos.

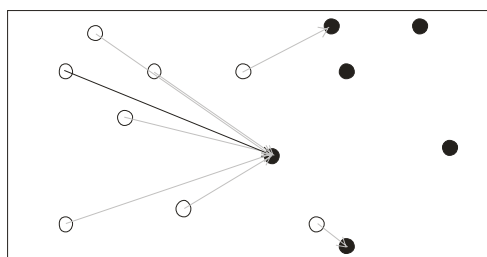
FIGURA 40. O PROCESSO DE CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE HAUSDORFF ENTRE DOIS CONJUNTOS.



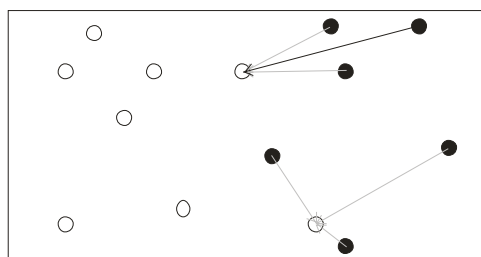
- Conjunto A
- Conjunto B



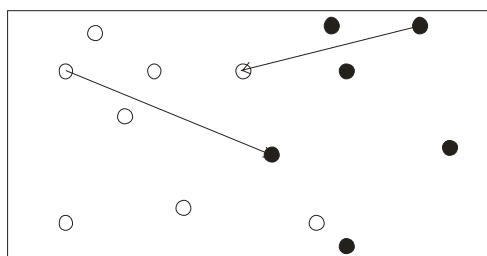
Calcula-se a distância do primeiro ponto de A a cada ponto de B
Registra-se a menor



O processo é repetido para todos os pontos de A e registra-se a maior das menores distâncias: $h(A,B)$



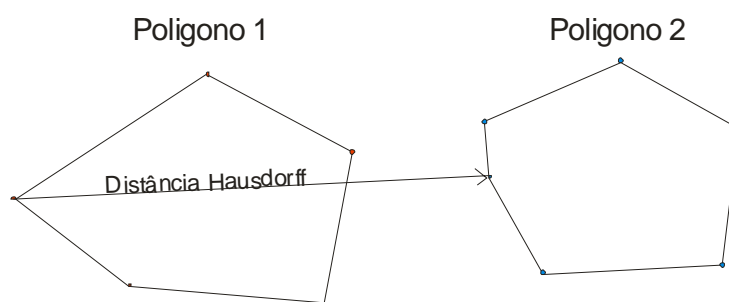
Agora todo o processo é repetido partindo-se do conjunto B e é registrada a maior das menores distâncias: $h(B,A)$



Finalmente são comparadas $h(A,B)$ e $h(B,A)$. A maior é a distância Hausdorff entre os conjuntos A e B

Pode-se determinar a distância entre dois polígonos para fins de descrição topológica calculando a HD entre esses. Se os polígonos são simples e convexos, não se interceptam e um não contém nem está contido no outro, o axioma apresentado por Grégoire e Bouillot (1998) permite uma solução para o problema baseada no mesmo processo de pontos finitos acima descrito. Segundo os autores, a HD entre os polígonos sempre será a HD entre o conjunto de vértices que formam o polígono, conforme a Figura 41 ilustra.

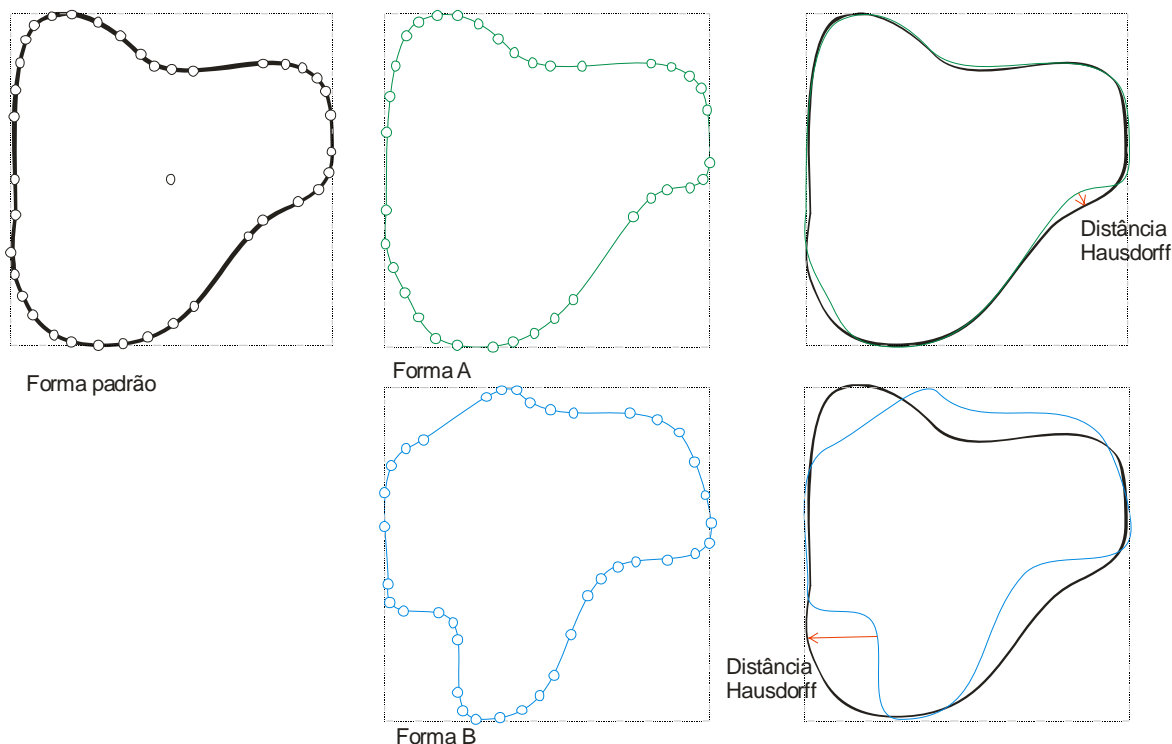
FIGURA 41. A DISTÂNCIA DE HAUSDORFF ENTRE POLÍGONOS CONVEXOS



Porém, quando o interesse é utilizar a métrica em questão para comparar formas, a abordagem exige maior rigor e uma análise mais complexa deve ser executada, pois essa condição simplificada não será verificada. Nesse caso a HD deve ser determinada entre as linhas que delimitam o polígono após a sobreposição dos mesmos. Quando as coordenadas dos pontos não são absolutas pode ser conveniente promover o alinhamento simétrico dos envelopes ou a coincidência dos centróides para uma melhor comparação. Em outros casos, rotações relativas do modelo podem ser permitidas e necessárias. Então, expressões como as descritas por Xiaozhou (2004) devem ser utilizadas para cada par de lados do polígono.

No exemplo da Figura 42 uma forma padrão é comparada com duas concorrentes a fim de determinar qual é mais similar. Um algoritmo de rápida convergência baseado na HD responde facilmente a questão. A forma cuja HD é menor será escolhida como mais similar à forma procurada.

FIGURA 42. A DISTÂNCIA HAUSDORFF NA COMPARAÇÃO DE FORMAS.

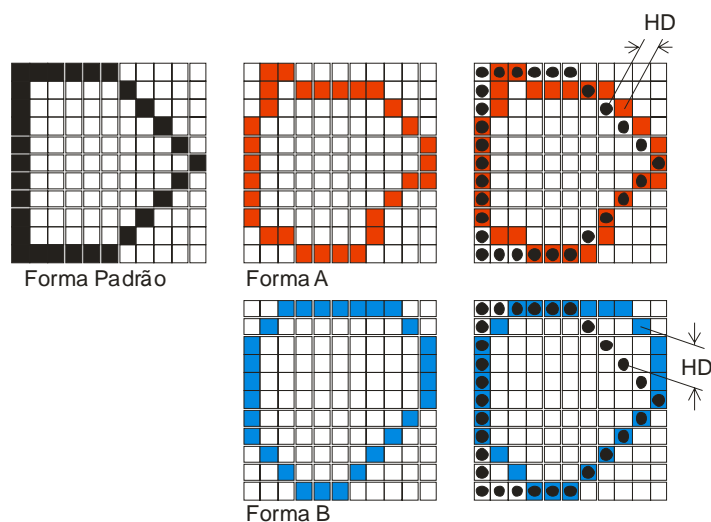


Observe-se como é contundente a decisão acerca da similaridade com base nesse único parâmetro. A utilização de métricas como a área, perímetro, fator de forma, compacidade, posição do centróide, entre outras, dificilmente conduziriam individualmente a um julgamento tão confiável. E a associação de todos esses parâmetros, no caso apresentado, não seria de tão simples julgamento. Pesa contra o uso da HD, no entanto, o alto consumo de tempo de processamento, isso em função de geometrias descrita por muitos vértices.

A forma geométrica pode estar também representada num espaço matricial, como píxeis numa imagem binária, conforme já foi escrito. O computo de HD, assim, volta a envolver somente a distância entre pontos, porém, contidos numa grade regular, registrada segundo referencial comum, permitindo o uso de artifícios de processamento de imagens e otimizando o tempo de processamento.

A Figura 43 introduz o problema a ser analisado.

FIGURA 43. DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE HAUSDORFF PARA DOIS OBJETOS RASTER (ABORDAGEM MATRICIAL).



A forma A não possui nenhum de seus píxeis afastados mais do que um píxel da forma padrão, enquanto a forma B possui píxeis cuja mínima distância euclidiana ao padrão é 2,36 píxeis. Medindo segundo a usual distância *city-block* (também conhecida como Manhattan ou *taxi-cab*, determinada pelo afastamento entre dois píxeis sem permitir deslocamentos diagonais) seriam 3 píxeis. Ou seja, $HD_A = 1$ e $HD_B = 3$, donde, a forma A é eleita como a melhor representação do padrão.

A princípio o cálculo de HD exigiria ($N_p \cdot N_q$) operações de determinação de distância entre píxeis, sendo N_p o número de pontos da forma padrão e

Nq o número de pontos da outra forma em teste. Mas pode-se otimizar esse procedimento com o uso da superfície de Voronoi (Paglieroni, 1992).

Considere-se a função $d(x)$ como segue:

$$d(x) = \min_{p \in P} \|x - p\| \quad (40)$$

onde P é um conjunto finito de pontos em \mathbb{R}^2 e o domínio de x é \mathbb{R}^2 . O gráfico da função $d(x)$ é uma superfície que tem sido chamada superfície de Voronoi e representa a distância ao ponto p mais próximo contada desde cada x . Essa superfície possui a forma de vários cones justapostos (similares a uma cartela para armazenar ovos) onde os mínimos valem zero e estão exatamente sobre cada p pertencente a P . Seus máximos estão na interceptação dos cones e sempre eqüidistantes de dois ou mais mínimos. A projeção desses máximos sobre o plano $d=0$ é conhecida como diagrama de Voronoi e correspondem às posições eqüidistantes de dois ou mais pontos de um conjunto.

A vantagem da abordagem baseada na construção da superfície de Voronoi é que para uma grade eqüidistante, como numa imagem digital, essa pode ser feita mediante o algoritmo abaixo, bastante simples, numa operação denominada transformada de distância (Borgefors, 1986).

i) Dado uma imagem binária (img) onde os pontos objeto valem um e o fundo zero;

ii) Criar uma imagem temporária (img_temp) com todos os pontos iguais a infinito positivo, exceto nas posições onde img vale um, para as quais img_temp será feito zero. Infinito positivo pode obtido pela classe Inf definida pelo IEEE e disponível na maioria das linguagens computacionais de alto nível ou por um valor suficientemente alto, maior que o número de píxeis da imagem, por exemplo.

iii) Para cada ponto de img_temp, desde o extremo superior esquerdo até o inferior direito efetuar:

- testar se o valor img_temp é diferente de Inf (ou seja, se vale zero) e se for:

- testar se o valor do ponto vizinho a direita é maior do que $(img_temp + 1)$ e se for fazê-lo igual a $(img_temp + 1)$;

- testar se o valor do ponto vizinho abaixo é maior do que $(img_temp + 1)$ e se for fazê-lo igual a $(img_temp + 1)$;

iv) Para cada ponto de img_temp , desde o extremo inferior direito até o superior esquerdo efetuar:

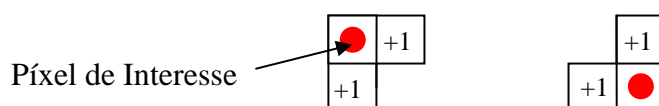
- testar se o valor img_temp é diferente de Inf e se for:

- testar se o valor do ponto vizinho à esquerda é maior do que $(img_temp + 1)$ e se for fazê-lo igual a $(img_temp + 1)$;

- testar se o valor do ponto vizinho acima é maior do que $(img_temp + 1)$ e se for fazê-lo igual a $(img_temp + 1)$;

Esse algoritmo é conhecido na linguagem computacional pela designação *grassfire* e corresponde a um acumulador progressivo realizado por duas convoluções em direções opostas por dois kernels simétricos como os da Figura 44.

FIGURA 44. O KERNEL PARA TRANSFORMAÇÃO DE DISTÂNCIA.



Na Figura 45, primeiramente, uma configuração de pontos-objeto é apresentada. Segue a aplicação do algoritmo acima e por fim o diagrama de Voronoi para o mesmo conjunto.

Uma vez aplicada à transformação de distância em todo o domínio da imagem, ou das imagens no caso da comparação de dois objetos, a determinação da HD torna-se uma operação de ordenamento de distâncias. Se A e B são as imagens binárias a serem comparadas e $d(A)$ e $d(B)$ as respectivas transformadas de distância, então a determinação de HD faz-se tomando o valor $d(A)$ nas posições correspondentes ao objeto de B e

determinando-se o maior. Repete-se a operação com o par $d(B)$ e A . O maior dentre os dois máximos encontrados será HD . Na Figura 46, o processo pode ser mais bem entendido e cabe afirmar que dessa forma o tempo para sua determinação reduz-se significativamente.

FIGURA 45. UM CONJUNTO DE PONTOS NUMA IMAGEM BINÁRIA. A TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA DA IMAGEM. O DIAGRAMA DE VORONÓI CORRESPONDENTE.

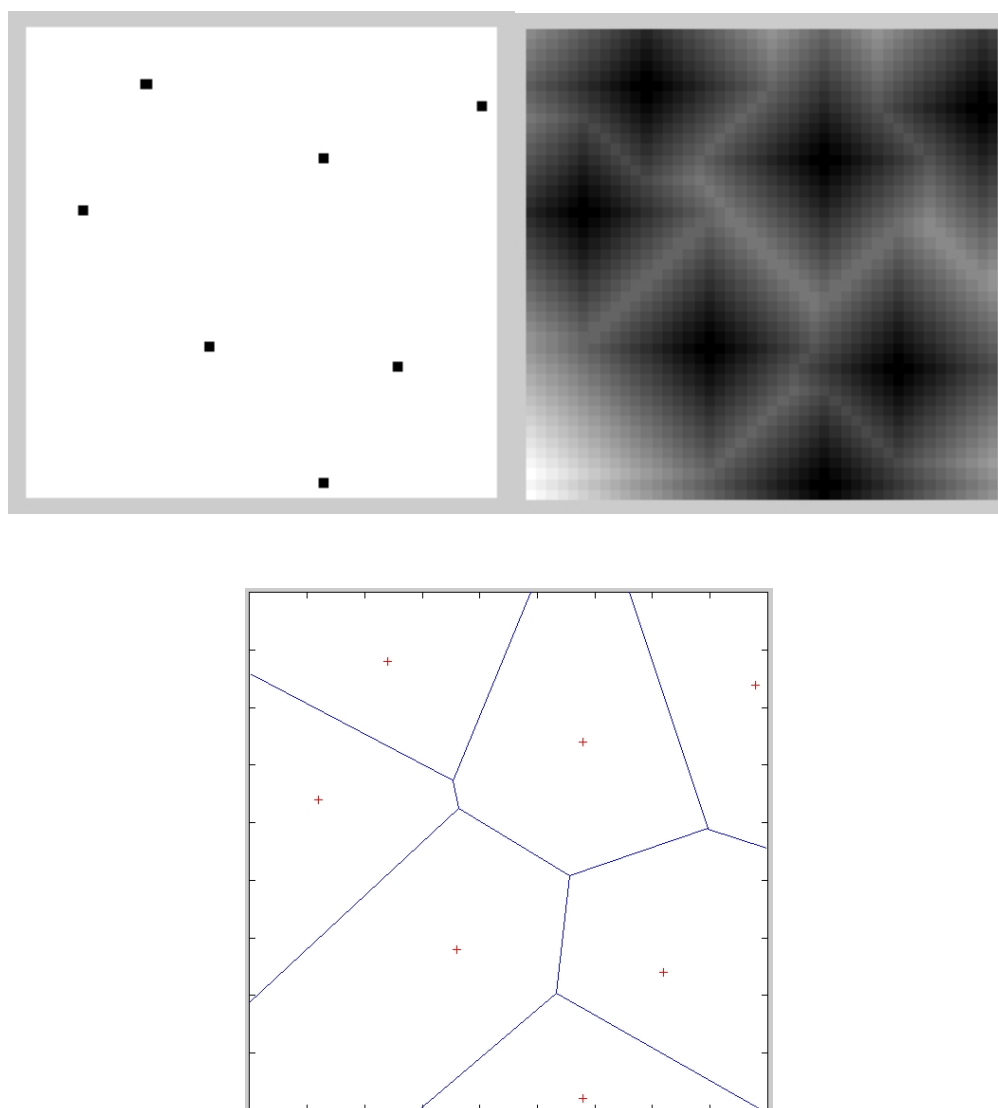
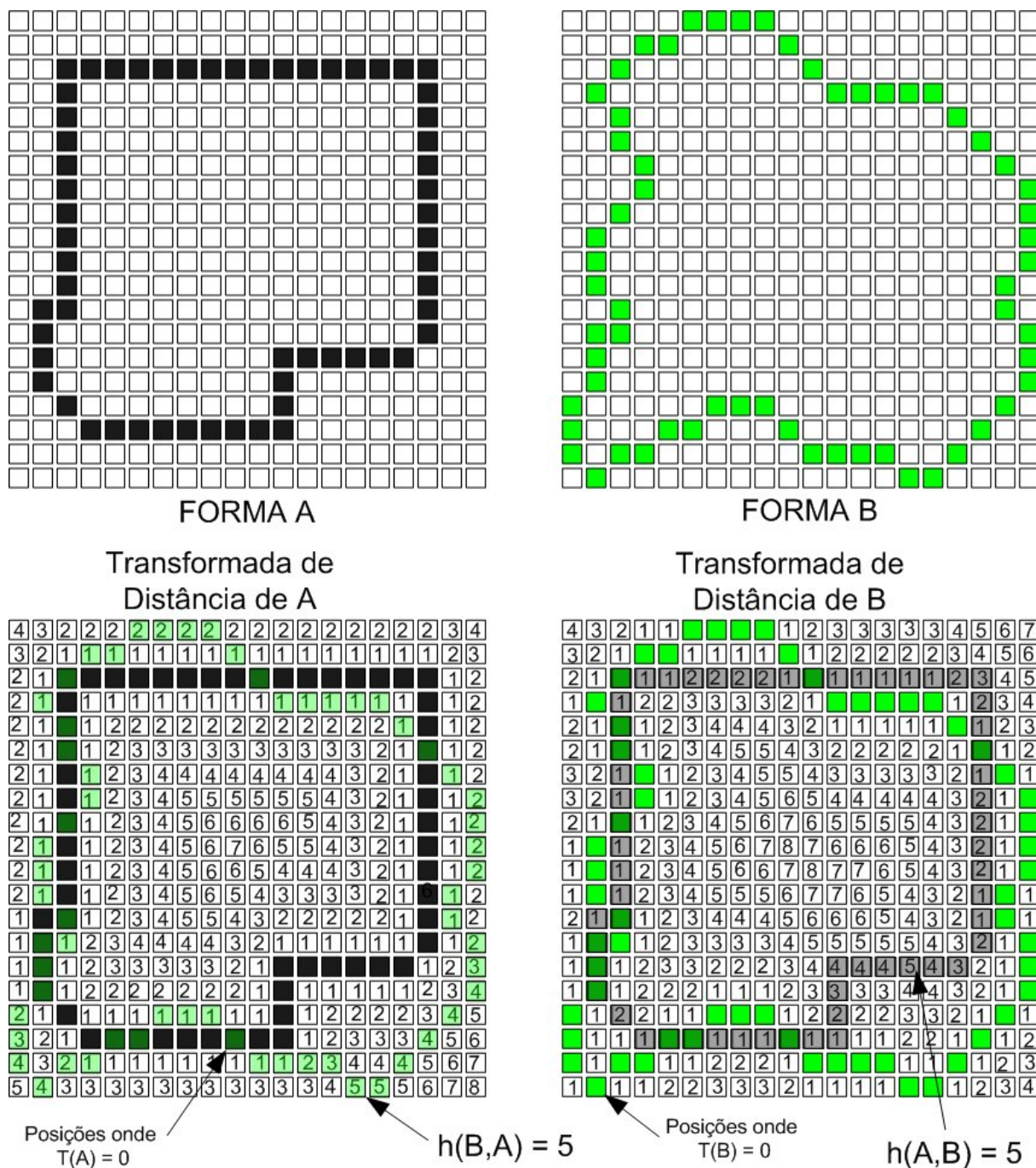


FIGURA 46. DETERMINAÇÃO DE HD EM FUNÇÃO DA TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA DAS IMAGENS DOS OBJETOS.



Coincidentemente, no exemplo apresentado $h(A,B)$, a máxima distância que separa qualquer ponto do conjunto A de outro do conjunto B é igual ao $h(B,A)$, o que não é a regra. Assim, a HD entre A e B será igual a 5 pixels.

Nos últimos anos, diferentes propostas para uso da HD no universo da análise de imagens têm sido feitas. Acréscimos conceituais e métodos computacionais otimizados, além de confronto com outras técnicas estão registrados, como por exemplo, em Orrite et al (2004).

No âmbito desse estudo, três dessas alternativas vão ser investigadas quanto a possibilidade de sua aplicação ao problema da verificação de compatibilidade entre uma representação cartográfica vetorial da realidade e uma imagem.

Uma das principais variantes de HD é a distância parcial de Hausdorff (PHD). Definida inicialmente por Huttenlocher (1993) propicia uma robusta comparação entre formas para o caso de se considerar válida a hipótese de similaridade entre objetos mesmo quando parte deles estiver bastante distinta. No caso da fotogrametria essa é uma importante premissa, pois é comum o caso de obstrução parcial por construções vizinhas ou vegetação de grande porte.

A definição de PHD é também bastante simples. No cômputo de HD toma-se a maior das menores distâncias. Porém, se listada em ordem decrescente as distâncias entre os pontos dos conjuntos e, alternativamente, a posição de máximo, for tomada uma posição intermediária na tabela, o valor correspondente a essa condição será a PHD. Em outras palavras, se ao invés do topo de uma tabela de 100 distâncias for tomado o 80º maior valor estará sendo desprezada na obtenção de HD as 20% maiores distâncias entre os conjuntos, uma tolerância a determinado nível de dissimilaridade.

Matematicamente:

$$H_{KL}(A, B) = \max(h_K(A, B), h_L(B, A)) \quad (41)$$

$$h_K(A, B) = K_{a \in A}^{esimo} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (42)$$

$$h_L(A, B) = L_{b \in B}^{esimo} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (43)$$

Como os conjuntos A e B podem, e normalmente possuem, tamanhos diferentes então K e L são as posições respectivas em A e B onde o mesmo percentual de pontos está sendo desprezado no cálculo da distância, ou seja:

$$K = (1-f) \cdot p \quad (44)$$

$$L = (1-f) \cdot q \quad (45)$$

onde p e q são os tamanhos dos conjuntos A e B e f é um valor entre zero e um correspondente ao percentual de pontos a serem desconsiderados no cálculo da distância.

A tabela 9 apresenta a ordem das distâncias em píxeis referentes às imagens da Figura 46. Também estão presentes as frequências de cada distância e uma simulação para $f = 0.1$.

No caso $h_6(A,B) = 3$ e $h_6(B,A) = 4$. Então o valor de PHD para esse exemplo será 4.

Uma alternativa mais ampla para comparar a forma de objetos em imagens como as desse exemplo é utilizar um índice baseado no número de pontos dos conjuntos que obedecem a uma condição de vizinhança, conceitualmente similar ao princípio de HD.

Essa é a proposta de Orriide (1994), por ele designada *Proximity Hausdorff Distance* e aqui convencionalmente descrita como vizinhança por HD, ou simplesmente, VHD.

Seja h_A o conjunto de pontos onde é válida a condição $\{\min\|a-b\| < P\}$ e h_B o correspondente conjunto onde $\{\min\|b-a\| < P\}$. O valor P é a máxima distância para que um ponto seja considerado suficientemente próximo ao outro a fim de computar VHD. Sendo K_A o número de pontos que satisfazem à primeira condição, K_B o correspondente para a segunda condição e dados p e q como os respectivos tamanhos dos conjuntos A e B, então

$$h_v(A,B) = \frac{K_A}{p} \text{ e } h_v(B,A) = \frac{K_B}{q} \quad (46)$$

E, por conseguinte:

$$VHD(A,B) = \min(h_v(A,B), h_v(B,A)) \quad (47)$$

No caso do exemplo acima sugerido, $p=59$ e $q=61$ e fazendo $P = 3$ píxeis, por consulta direta a tabela 9, resulta $h_v(A,B) = (59 - 9)/59 = 0,847$ e $h_v(B,A) = (61 - 12)/61 = 0,803$. Assim, $VHD(A,B) = 0,803$. Esse resultado indica que pelo menos 80% dos pontos dos conjuntos comparados estão distantes uns dos outros menos do que 3 píxeis.

TABELA 9. ESTRUTURA DE DADOS COM ORDENAMENTO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS OBJETOS DA FIGURA 46 PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA PARCIAL DE HAUSDORFF E DA VIZINHANÇA POR HD.

Ordem	a-b	Freq. a-b	b-a	Freq. b-a
1	5	1	5	2
2	4	4	5	
3	4		4	6
4	4		4	
5	4		4	
6 (10% dos pontos)	3	3	4	
7	3		4	
8	3		4	
9	2	13	3	3
10	2		3	
11	2		3	
12	...		2	12
	2		2	
	1	25	...	
	1		1	25
	...		1	
	0	13	...	
	...		0	13
	0		...	
	0		0	
59 (nro. ptos de A)	0		0	
60			0	
61 (nro. ptos de B)			0	

Um outro método, mais rigoroso, leva em conta não somente um limite de proximidade, mas também um limite de continuidade da proximidade das feições comparadas. Ou seja, não somente será considerado compatível um ponto cuja distância ao outro conjunto esteja dentro de um limite, mas

apenas aquele que pertencer a um segmento conexo todo contido nesse limite. Dois parâmetros então serão necessários, P (a distância máxima admitida) e L o comprimento mínimo do segmento conexo. Esse índice será dito Vizinhança Contínua por HD ou somente CHD.

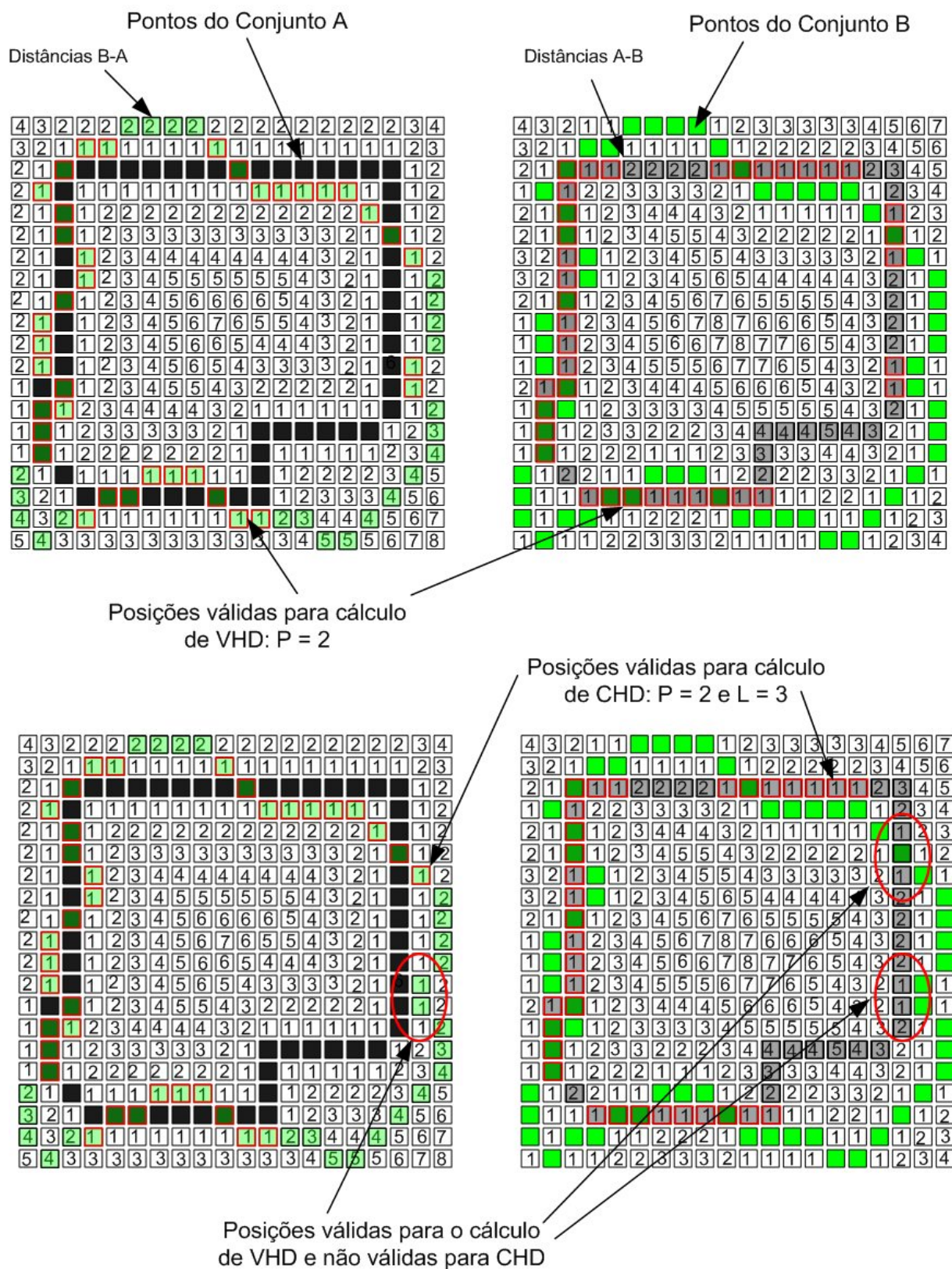
Nesse caso não basta a análise de uma tabela de distâncias ordenada. Cabe a análise seqüencial dos pontos que delimitam o objeto e a determinação iterativa das condições estabelecidas.

A Figura 47, baseada na Figura anterior, ilustra o processo. Se $P = 2$ (somente são computados pontos cuja distância é menor do que 2 píxeis) e $L = 3$, indicando que somente serão considerados segmentos com mais de 3 pontos conexos então $h_c(A,B)=33/59=0,56$ e $h_c(A,B)=36/61=0,59$, donde, $CHD = 0,56$.

Fica claro na ilustração a diferença entre CHD e VHD. No caso de VHD os pontos em destaque seriam incluídos no cômputo do índice utilizado para análise de similaridade e os valores seriam $h_v(A,B)=38/59=0,64$; $h_v(B,A)=38/61=0,62$ e $VHD(A,B)=0,62$.

Em suma CHD é uma medida mais conservadora do que VHD e evita muitas vezes falsos resultados positivos de similaridade.

FIGURA 47. CALCULO DE VHD E CHD PARA OS MESMOS OBJETOS DA FIG. 46.



4. METODOLOGIA

Todos os itens abordados no capítulo anterior serão aqui harmonicamente integrados a fim de compor uma proposta de solução ao problema objeto desse estudo já descrito na introdução: determinar automaticamente alterações nos cenários urbanos, ao nível de lote, tomando como referência uma base cartográfica digital pré-existente e como dado de comparação um conjunto de imagens obtidas por voo aerofotogramétrico empregando câmara digital de baixo custo.

Muitos dos conceitos, modelos e algoritmos referidos são consagrados. Outros representam inovações recentes. Serão adaptados e associados num contexto original que visa à análise automatizada das imagens.

Um conjunto de dados foi obtido mediante solicitação aos órgãos competentes para a realização de experimentos de campo e é disponibilizado para realização dos testes apresentados.

4.1. Caracterização dos Dados

Dados de dois centros urbanos estarão sendo utilizados nos testes apresentados na seqüência: Pelotas no Rio Grande do Sul e Matinhos no litoral do Paraná. As ilustrações das Figuras 48, 49 e 50 apresentam a localização e vistas dessas cidades.

Pelotas é um dos mais importantes municípios do interior do Rio Grande do Sul, localizada próximo à Lagoa dos Patos no litoral sul do estado nas coordenadas 31° 45' de latitude (S) e 52° e 19' de longitude (W), com aproximadamente 350.000 habitantes e uma área territorial de 1600 km². Matinhos é um balneário do litoral sul do Paraná, cujas coordenadas estão próximas aos 25° 50' (S) e 48° 33' (W), possui cerca de 32.000 habitantes e que ocupa uma área de não mais do que 120 km².

FIGURA 48. LOCALIZAÇÃO DOS SÍTIOS DE ESTUDO: PELOTAS-RS E MATINHOS-PR (FONTE GOOGLE EARTH©)



FIGURA 49. VISTA DA CIDADE DE PELOTAS – RS E DETALHE DA LINHA DE VÔO (ARTE SOBRE IMAGEM DO GOOGLE EARTH©)



FIGURA 50. CIDADE DE MATINHOS – PR E DETALHE DA LINHA DE VÔO (ARTE SOBRE IMAGEM DO GOOGLE EARTH©)



Como pode ser depreendido das ilustrações, ambas as cidades estão erigidas sobre áreas bastante planas. A altitude geométrica média da cidade de Pelotas é de 10 m e a variabilidade em torno desse valor é de ± 5 m. Matinhos está à beira mar e sua altitude geométrica medida sobre o elipsóide do datum do Sistema Geodésico Brasileiro (SAD 69) é de 5 m. Esse aspecto é muito importante e será novamente citado quando hipóteses simplificadoras forem adotadas e quando a análise de precisão da aerotriangulação e ortorretificação das imagens for apresentada.

O vôo experimental sobre Pelotas foi efetuado em fevereiro de 2003, num convênio entre a Prefeitura Municipal e a Fundação Universidade Federal do Rio Grande com o uso de uma câmara Kodak DCS 460 gerando imagens de 6 MPíxeis (3060 x 2036). Adotada uma altitude de vôo de 850 m a resolução média das imagens resultou próxima aos 30 cm. Na Figura 49, as linhas em amarelo representam a faixa cujas imagens serão exploradas.

A linha de vôo sobre Matinhos foi executada em julho de 2005 no âmbito do projeto de Babinsck (2006). A faixa de vôo está ilustrada na Figura 50, como a anterior. A câmara que gerou as imagens é a Sony F-707, de propriedade da empresa AGRITEC S.A. Agrimensura e Aerofotogrametria, que opera com um CCD Super Had de 2560x1920 píxeis. A baixa altura de vôo planejada e realizada permitiu a obtenção de uma resolução de aproximadamente 20 cm. As imagens das figuras 51 e 52 são exemplos dos produtos obtidos, respectivamente, em Pelotas e Matinhos.

FIGURA 51. EXEMPLO DE IMAGEM OBTIDA NO LEVANTAMENTO DA CIDADE DE PELOTAS COM USO DE UMA CÂMARA KODAK DCS 460.



FIGURA 52. EXEMPLO DE IMAGEM OBTIDA NO LEVANTAMENTO DA CIDADE DE MATINHOS COM USO DE UMA CÂMARA SONY F707.



Uma das razões mais importantes para que esses dois sítios fossem escolhidos para o estudo foi a disponibilidade de dados cartográficos e cadastrais de suas áreas urbanas.

Junto à Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Pelotas foram obtidos uma base cartográfica completa da área urbana, ao nível de lote, resultante da restituição em meio digital efetuada sobre um vôo aerofotogramétrico do ano de 1996 e dados básicos das construções então existentes. Observe-se que em relação às imagens obtidas esses dados estão sete anos defasados.

As informações da cidade de Matinhos foram obtidas por intermédio do Paranacidade, organização privada, sem fins lucrativos e vinculada à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano do Paraná e cuja missão é prestar assistência institucional e técnica aos municípios. São dados do Conselho de Desenvolvimento Territorial do Litoral Paranaense restituídos de fotografias de 1996. Compõem o pacote de dados uma base cartográfica digital completa, como a de Pelotas, com níveis de lotes e construções e dados cadastrais das construções, como área, número de pavimentos, tipo e uso.

Em ambos os conjuntos de informações estão disponíveis pontos cotados no terreno em densidade suficiente para permitir interpolação e construção de um modelo numérico digital do terreno (MNDT).

As figuras 53 e 54 ilustram o tipo de base cartográfica e as estruturas de dados geradas a partir dos cadastros disponibilizados para o processamento teste da metodologia. Nas Figuras 55 e 56 o MNDT das áreas de Pelotas e Matinhos.

É fundamental aqui dar conta da completude das informações disponíveis, em todas as suas formas. As imagens são coloridas, de alto contraste e definição, obtidas com superposição adequada ao procedimentos estereoscópico, se necessário. As bases cadastrais são produtos que incorporam o resultado de restituição em escala 1:2000, em formato digital estruturado e cuja precisão foi verificada em experimento de campo resultando totalmente enquadrada na PEC (Padrão de exatidão cartográfica) classe A, ou seja, 90% dos pontos apresentaram erros inferiores a 0,3 mm na escala da carta. Associados a essa constatação estão os bons resultados obtidos e apresentados a seu tempo.

FIGURA 53. BASE CARTOGRÁFICA DA CIDADE DE MATINHOS COM ILUSTRAÇÃO DE DADOS CADASTRAIS VINCULADOS.



FIGURA 54. BASE CARTOGRÁFICA DA CIDADE DE PELOTAS.

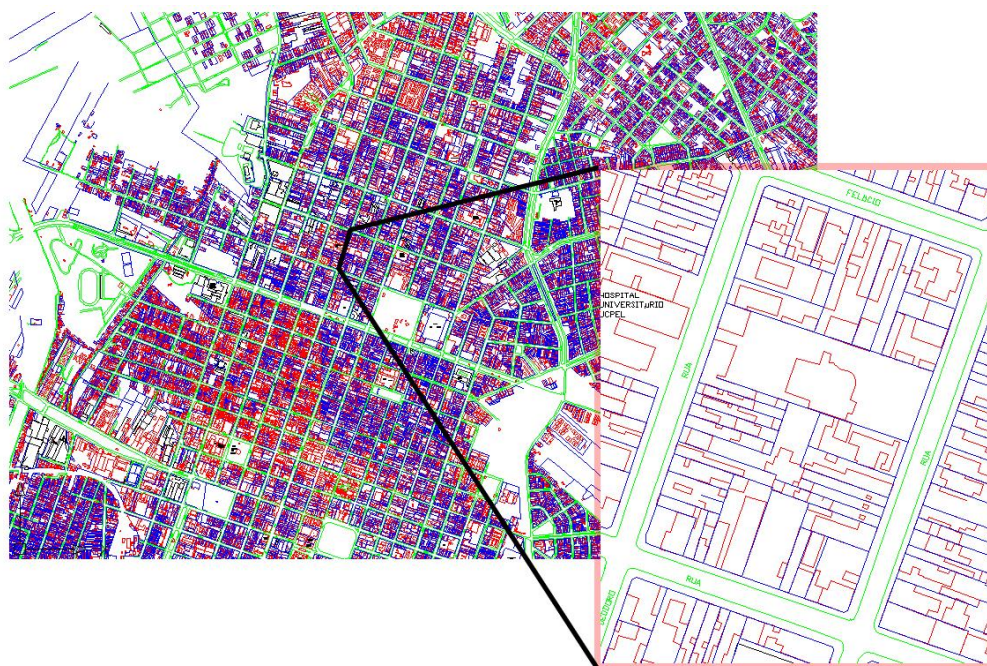


FIGURA 55. MODELO NUMÉRICO DIGITAL DO TERRENO DE PELOTAS

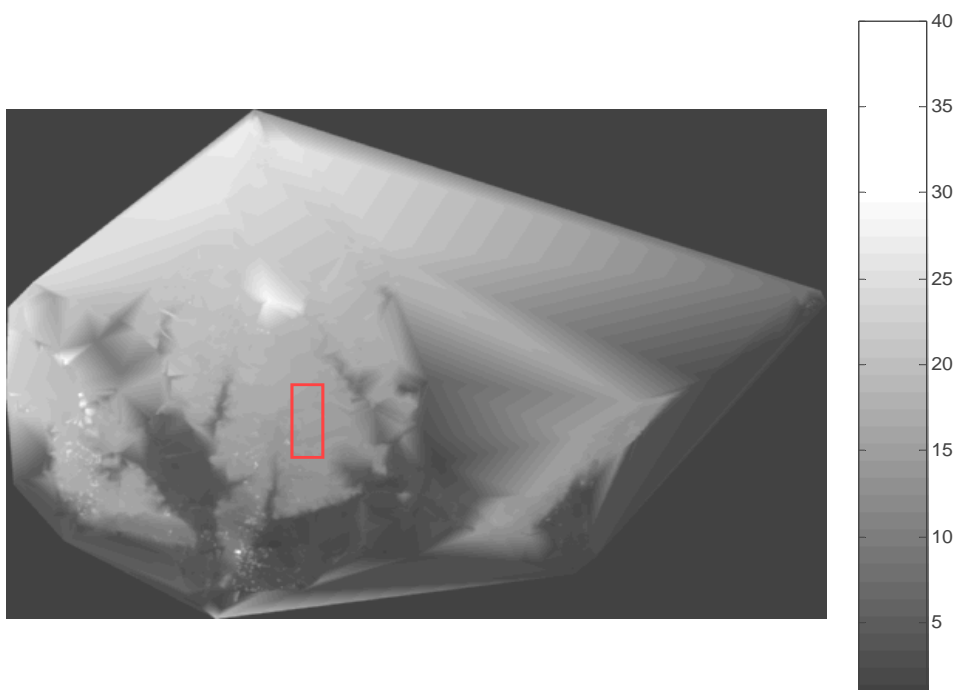
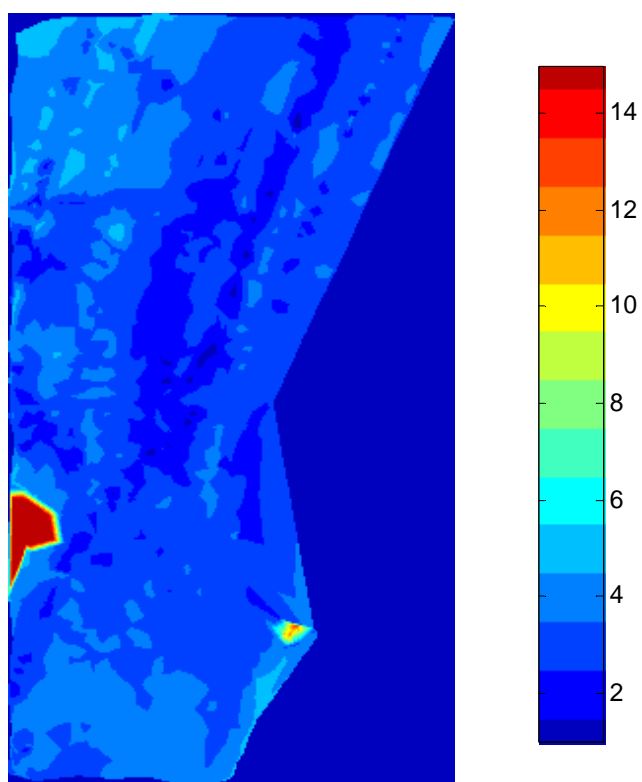


FIGURA 56. MODELO NUMÉRICO DIGITAL DO TERRENO DE MATINHOS



4.2. Processamento Fotogramétrico

Como já foi dito e pode ser apreendido dos dados apresentados, o processamento descrito desde esse ponto do estudo será executado no sentido de detectar, ao nível de lote, as alterações da cena mostrada nas bases cartográficas das cidades de Pelotas e Matinhos, datadas de 1996 mediante comparação automática com as imagens aerofotográficas obtidas com as câmaras digitais Kodak DCS 460 e Sony DSC F-707, respectivamente, em 2003 e 2005.

Cabe, de imediato, delimitar a fronteira dessa detecção de mudanças na paisagem ao problema de seleccionar automaticamente os lotes onde a informação da imagem não está compatível com a informação da base vetorial. Não se trata, pois, de efetuar a atualização propriamente dita, mas sim de medir com confiabilidade o quanto os dados provenientes dessas duas fontes estão compatíveis ou não, remetendo o problema da atualização da cartografia a um sistema assistido, interativo.

Fica claro então que essa comparação será executada no espaço, definido segundo coordenadas cartesianas tridimensionais. Daí a necessidade de todos os dados serem conhecidos no mesmo sistema de referência espacial. Concretamente: a princípio cada imagem está definida segundo um referencial próprio, associado ao sensor da câmara e as entidades da base cartográfica vetorial são conhecidas em relação ao referencial geodésico. O sistema da imagem pode ser dito de dispositivo enquanto o da base cartográfica é compatível com o mundo real. Ainda, como já foi discutido nos itens 3.1.1 e 3.1.2, as coordenadas dos pontos da imagem são planas, meramente a contagem de linhas e colunas (pode-se dizer adimensionais, embora estejam associadas às dimensões de uma pequena área do sensor) enquanto as coordenadas dos objetos da base cartográfica são tridimensionais, no caso das disponibilizadas nesse trabalho, medidas em metros.

Pelo carácter multidisciplinar ao qual esse texto remete faz-se aqui uma breve observação acerca dessas últimas coordenadas. A base cartográfica é

composta de dois elementos: entidades vetoriais conhecidas no plano e referidas ao sistema de coordenadas UTM, definido conforme datum oficial brasileiro (SAD69) e um MNDT, uma malha regular de pontos no mesmo referencial da base onde as altitudes são conhecidas em relação à referência de nível oficial, o máregrafo do porto de Imbituba no litoral de SC. Assim, associando-se esses dois referenciais encontra-se um único, local, tridimensional.

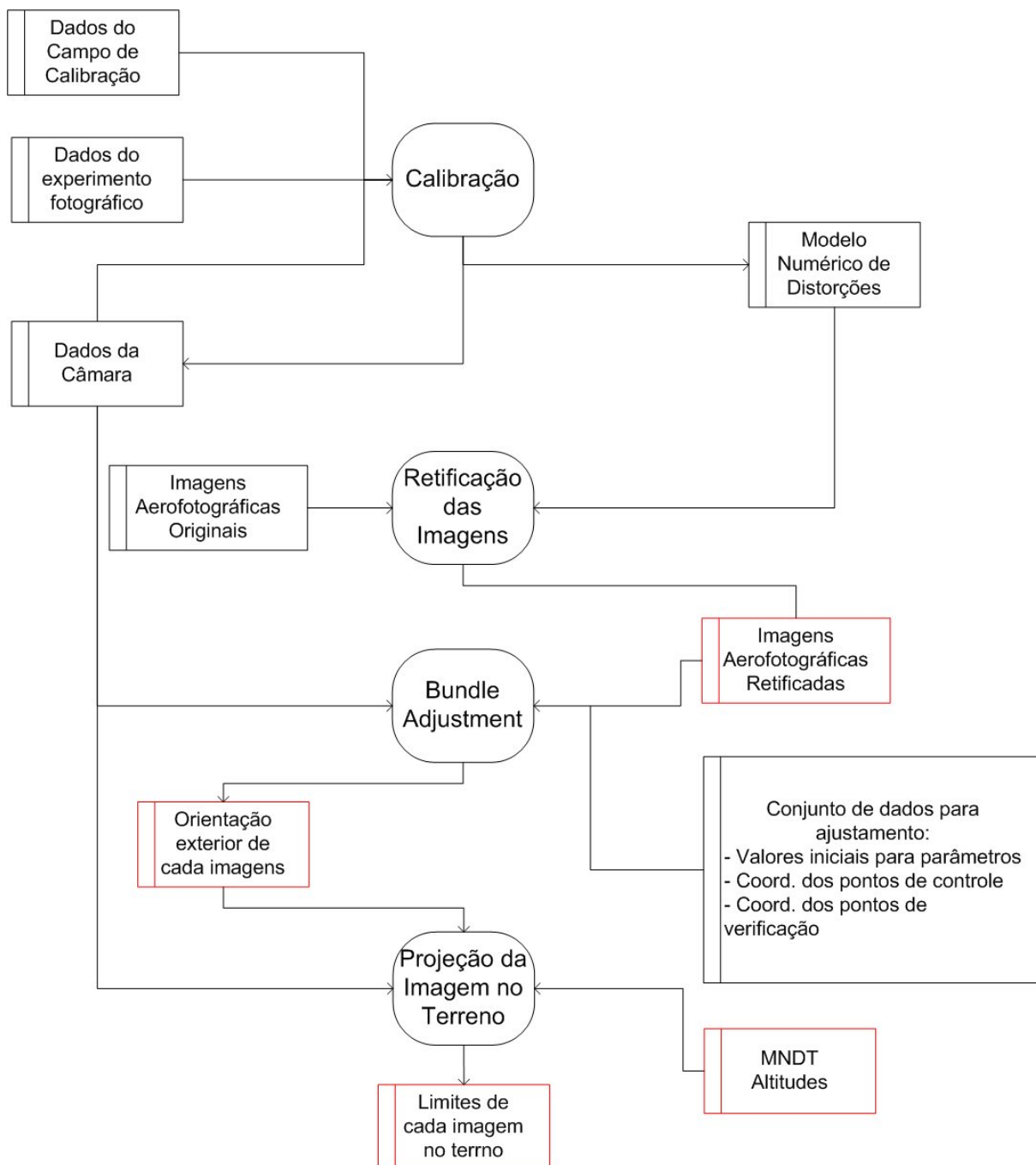
Relembrando, o sistema UTM é um referencial de coordenadas métricas plano-retangulares para localização terrestre. Está definido em 60 zonas, múltiplas de 6 graus de longitude, na Projeção Universal Transversa de Mercator. O sistema possui múltiplas origens, uma para cada zona, todas localizadas no Equador no ponto em que intercepta o meridiano central de cada zona. Os valores de coordenadas crescem de S para N e de W para E. Além disso, as coordenadas N são acrescidas da constante 10.000.000 e E de 500.000 para evitar valores negativos ao sul e W da origem.

As áreas de estudo desse trabalho estão todas no fuso 22, cujo meridiano central é 51°. Uma coordenada típica em Pelotas é 6485000N 373500 E, que indica um ponto que está distante $(10000000 - 6485000) = 3515$ Km ao sul do Equador e $(500000 - 373500) = 126.5$ Km a oeste do meridiano 51°. Em Matinhos teremos algo como 7143000N 747000E, ou seja, segundo a mesma métrica, a 2857 Km do Equador e a 247 Km a leste do meridiano 51°.

Retornando ao problema central aqui analisado, compatibilizar os sistemas de coordenadas significa associar coordenadas de terreno aos pontos da imagem e/ou determinar em que imagem e onde na imagem uma determinada feição do terreno será encontrada. Esse processamento, em linguagem fotogramétrica, é resolver a orientação interior e exterior, conforme descrito no item 2.1 do capítulo 2.

A Figura 57 mostra a *pipeline* de processamento utilizada para permitir solução de alta precisão ao problema acima referido.

FIGURA 57. FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO VISANDO À ORIENTAÇÃO EXTERIOR DAS IMAGENS



4.2.1. Calibração da câmara e retificação das imagens

O primeiro processo do fluxograma da Figura 57 é a calibração da câmara, cujo objeto de saída será uma distância focal calibrada (a ser armazenada na estrutura de dados da câmara) e um modelo numérico de distorções (MND), conforme detalhado no item 3.1.3.

A câmara utilizada no voo de Matinhos foi calibrada no experimento de Babinski (2006), resultando conhecidos todos os parâmetros necessários à solução da Eq. 11. Nesse caso, para o uso do sistema implementado foi feita simplesmente a determinação da correção ponto a ponto da imagem para construção do MND.

Já no caso do voo sobre Pelotas foi aplicado um método de calibração conforme detalhado no item 3.1.3, a fim de se determinar diretamente as correções das distorções.

Para aplicação desse procedimento é necessário inicialmente um campo de calibração cujas características geométricas sejam conhecidas com precisão (dados do campo de calibração no fluxograma). Conforme sugerido e justificado o campo utilizado nesse estudo é nada mais do que um plano composto de um reticulado com linhas horizontais e verticais igualmente espaçadas e de alto contraste com o fundo, conforme mostra a Figura 58.

Desse campo deve ser tomado um conjunto de fotografias. A questão do número de fotos e da orientação da câmara em cada uma delas já foi discutida. A fim de comparar os resultados obtidos utilizando ambos os métodos de calibração (o convencional ajustamento por mínimos quadrados para determinação de parâmetros conforme Eq. 11 ou para obtenção de um modelo numérico de distorções) optou-se por efetuar 4 tomadas segundo a configuração mostrada na Figura 59, todas visando ao centro do reticulado. A imagem obtida da posição 1 é apresentada na Figura 60.

FIGURA 58. CAMPO DE CALIBRAÇÃO RETICULADO

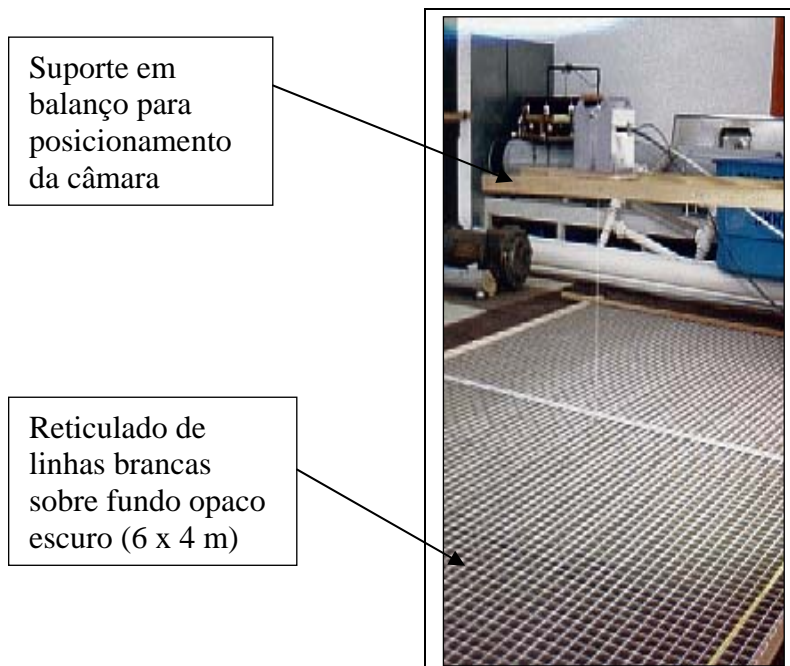


FIGURA 59. CONFIGURAÇÃO DAS TOMADAS FOTOGRÁFICAS PARA CALIBRAÇÃO DA CÂMARA.

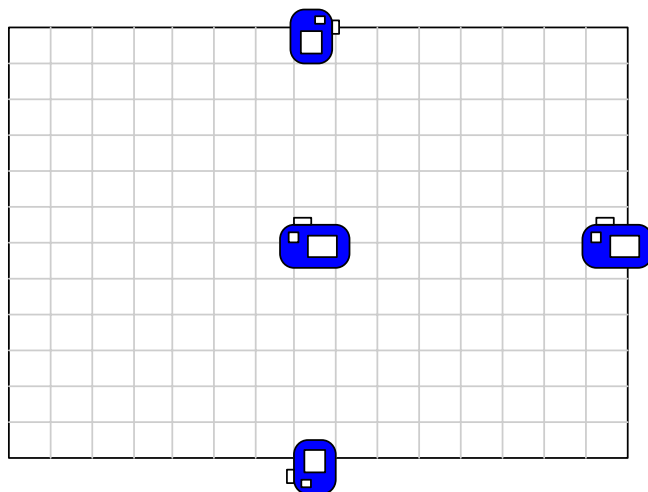
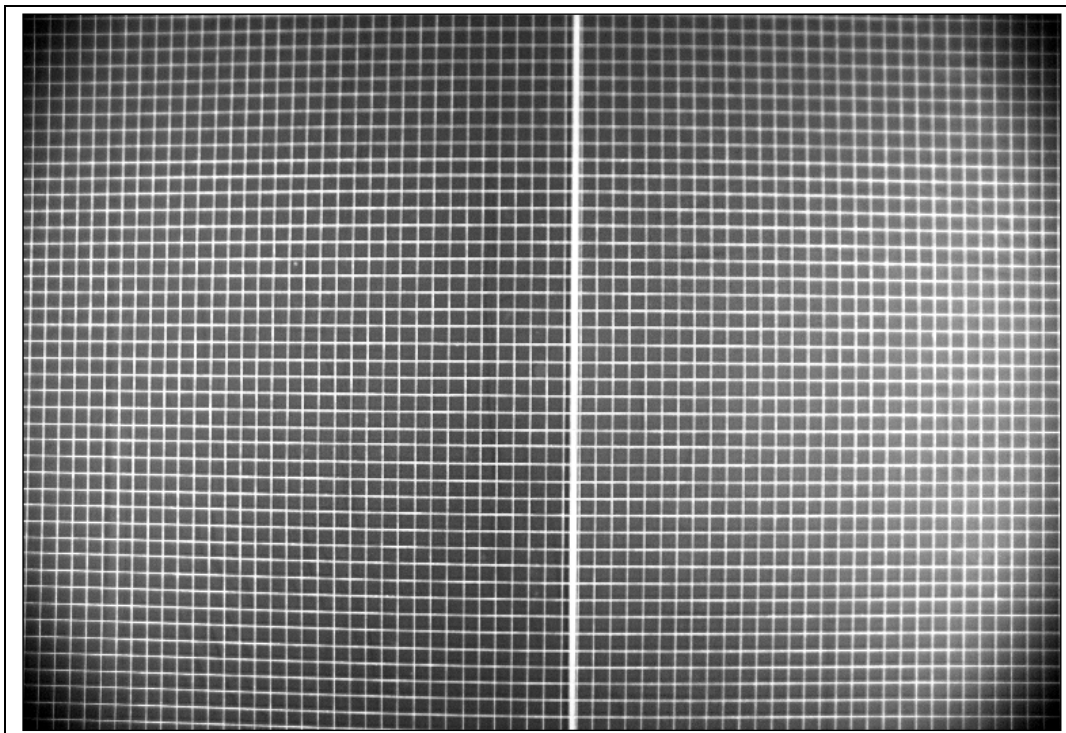


FIGURA 60. IMAGEM EM TONS DE CINZA DA POSIÇÃO 1 (FIGURA 59)
DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO UTILIZADA



Todas as coordenadas de imagem dos cruzamentos de linhas são obtidas mediante um algoritmo de máxima correlação para detecção de um padrão na forma (+), conforme Gonçalves e Mitishita (2004). Evidentemente as coordenadas no espaço objeto são facilmente calculadas em função da distância de 10 cm entre linhas e da adoção de uma origem arbitrária.

A aplicação do algoritmo de determinação direta de MND (item 3.1.3) resultou numa distância focal calibrada para a câmara Kodak DCS 460 de $20,4580 \pm 0,0064$ mm e nas duas matrizes com correções para as coordenadas x e y, respectivamente apresentadas nas Figuras 61 e 62. Na Figura 63 está um diagrama de vetores amostrados onde é possível visualizar o tipo de deslocamento que os pontos da imagem original devem sofrer para gerar a imagem retificada.

FIGURA 61. MND PARA A DIREÇÃO X. CÂMARA KODAK DCS 460. O PONTO BRANCO REPRESENTA O CENTRO ÓPTICO PROJETADO NO PLANO IMAGEM.

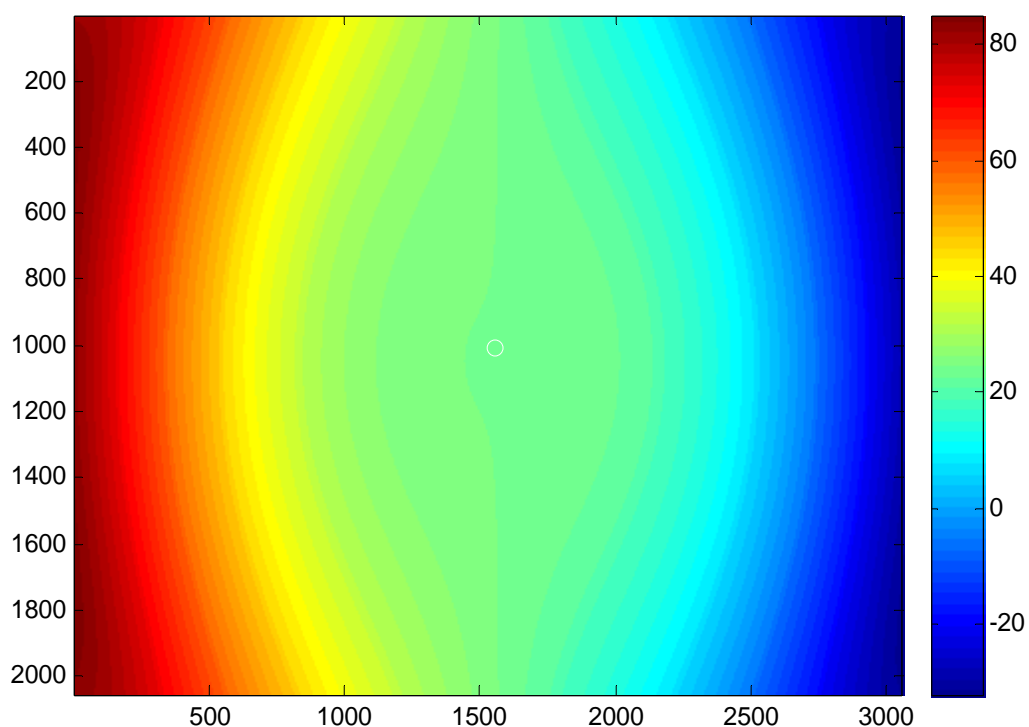


FIGURA 62. MND PARA A DIREÇÃO Y. CÂMARA KODAK DCS 460. O PONTO BRANCO REPRESENTA O CENTRO ÓPTICO PROJETADO NO PLANO IMAGEM.

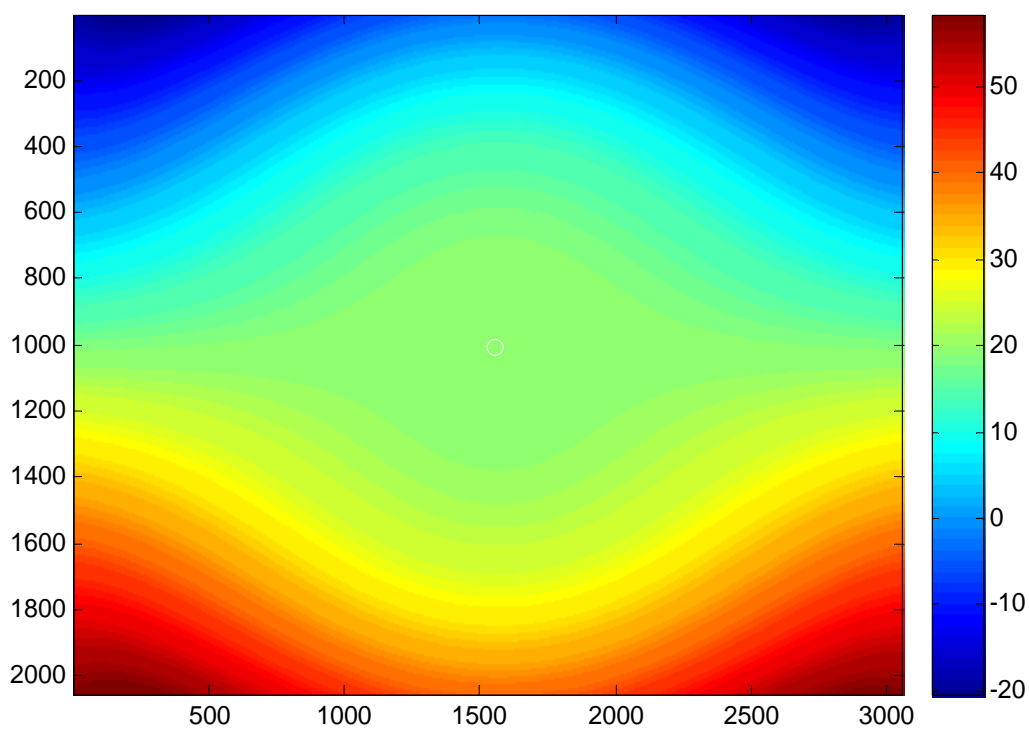
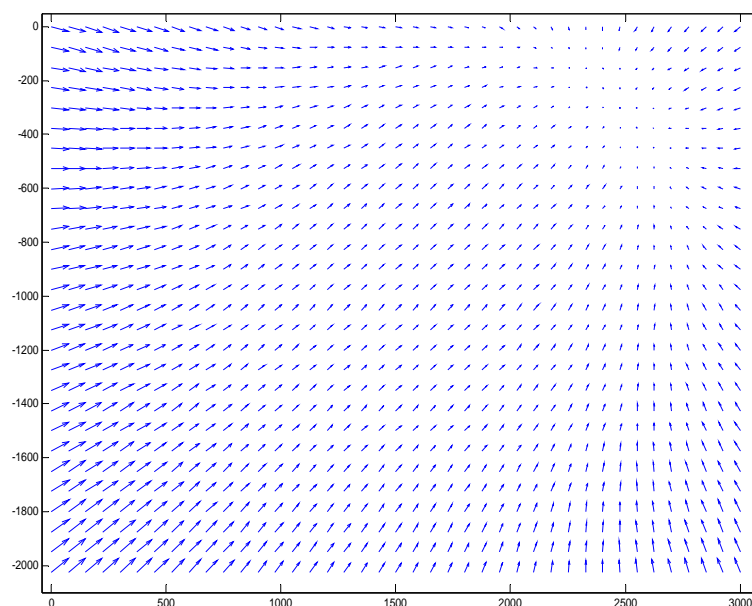


FIGURA 63. COMPOSIÇÃO VETORIAL DAS CORREÇÕES EM FUNÇÃO DAS COMPONENTES APRESENTADAS NAS FIGURAS 61 E 62.



Essa mesma câmara foi alvo de um processo de calibração registrado em Dias (2005) e cujos parâmetros de calibração são mostrados na tabela 10. Observe-se que os valores de distância focal calibrados diferem de 0,014 mm dentro da margem de variação associada à soma dos desvios encontrados nos processos de ajustamento.

Além disso, a título de comparação, foi calculado um mapa de distorções baseado nos parâmetros apresentados e feita a diferença, pixel a pixel, dos valores de correções obtidos nos dois sistemas. O resultado indicou uma disparidade máxima da ordem de 2 pixels. Porém, para 92% dos pontos, os valores encontrados diferem da ordem de grandeza menor ou igual a um pixel, indicando a validade do processamento.

Voltando ao fluxograma, de posse dos resultados das calibrações, sumarizadas nos MNDs, cabe aplicar a correção das distorções em todas as imagens obtidas. E assim foi feito. Um dos resultados obtidos está apresentado na Figura 64. Pode-se perceber as concavidades em preto nas bordas da imagem resultantes da retificação.

É importante entender que se assumida como verdadeira a hipótese de que os MND possuem as correções dos erros sistemáticos do processo de

imageamento, então o centro dessa imagem é o ponto principal do sistema; e ainda são colineares os demais pontos da imagem, seus respectivos homólogos no terreno e o centro óptico da objetiva da câmara.

TABELA 10. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO PARA A CÂMARA KODAK DCS460 (OLIVEIRA, 2005)

Parâmetro	Valor	Desvio Padrão
F	20,4721mm	0,0086
X	-0,2201mm	0,006
Y	0,1772mm	0,0058
K1	-0,27779548D-03mm	0,45553530D-05
K2	0,29131078D-06mm	0,46650169D-07
K3	0,81717697D-09mm	0,14490604D-09
P1	0,15000802D-04mm	0,45117474D-05
P2	0,10449000D-04mm	0,42303818D-05

FIGURA 64. IMAGEM RETIFICADA DOS ERROS SISTEMÁTICOS MAPEADOS PELO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.



4.2.2. Ajustamento simultâneo por feixe de raios.

O item 3.1.2, que versa sobre orientação exterior, introduz brevemente o consagrado conceito do *Bundle Adjustment*, referindo-se ao ajustamento simultâneo de um bloco de fotos por múltiplos feixes de raios. Esse processo de ajustamento foi aplicado aos dois conjuntos de imagens. Aquele utilizado nas imagens de Matinhos será aqui descrito em detalhes.

A Figura 11 apresentada no capítulo anterior resulta de uma primeira orientação aproximada do bloco a ser resolvido. Desse mosaico semi-controlado são obtidos valores iniciais da posição central de cada foto e do ângulo de orientação com a direção leste (zero do sistema de referência), conforme demonstrado em 3.1.2.

Um conjunto de pontos notáveis da paisagem urbana, facilmente observados tanto na base cartográfica quanto nas imagens, devem ter suas coordenadas lidas em ambos os espaços e servirão de pontos de apoio e verificação do resultado final. Evidentemente esses pontos devem estar presentes no mínimo em duas imagens consecutivas e essas imagens são as resultantes do processo de retificação tratado no item anterior. No caso do bloco em questão foram 10 pontos de apoio e 6 de verificação. Além disso, nas áreas de sobreposição das imagens um conjunto de pontos de ligação foram observados, no mínimo 6 em cada modelo. No total 138 pontos foram lidos, alguns presentes em três fotos. A configuração final desses pontos é apresentada na Figura 65.

Ao final dessas operações estarão disponíveis valores iniciais para os parâmetros de orientação exterior ($X_0, Y_0, Z_0, K, \Phi, \Omega$) de todas as imagens que compõem o bloco. Além disso, um conjunto de pontos de ligação entre fotos, outros para apoio do bloco e outro para verificação do resultado. As tabelas 11, 12 e 13 apresentam a forma dessas matrizes.

FIGURA 65. CONFIGURAÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE E LIGAÇÃO PARA O BLOCO DE IMAGENS AEROFOTOGRAFICAS DE MATINHOS

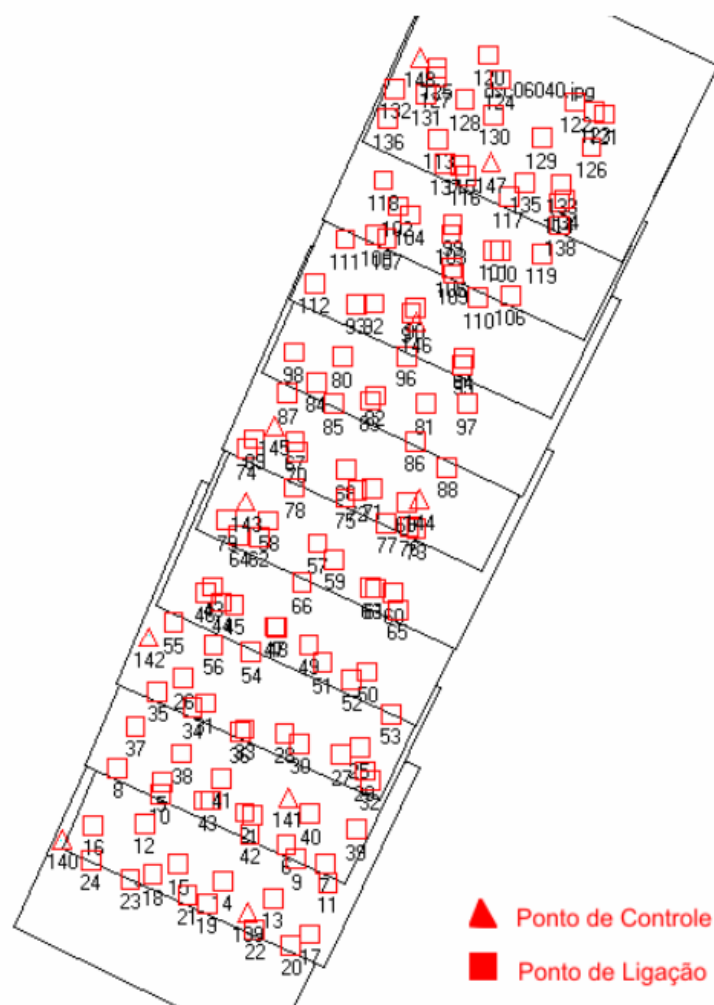


TABELA 11. VALORES INICIAIS PARA PARÂMETROS DO BLOCO

NRO FOTO	XO	YO	ZO	OMEGA	PHI	KAPPA
1	747000	7142210	600	0	0	330
2	747100	7142320	600	0	0	330
3	747150	7142485	600	0	0	330
4	747210	7142610	600	0	0	330
5	747290	7142760	600	0	0	330
6	747300	7142900	600	0	0	330
7	747395	7143000	600	0	0	330
8	747470	7143150	600	0	0	330
9	747530	7143300	600	0	0	330
10	747590	7143430	600	0	0	330
11	747600	7143550	600	0	0	330

TABELA 12. COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE PARA INJUNÇÃO DO
BLOCO

NRO PTO	COORD E	COORD N	H
139	747169,38	7142202,51	2,8
140	746843,83	7142330,63	2,6
141	747240,88	7142403,42	2,7
142	746995,68	7142685,15	1,9
143	747165,98	7142922,62	1,6
144	747471,04	7142925,84	1,6
145	747216,43	7143055,22	2,6
146	747465,83	7143236,63	2,8
147	747596,38	7143516,52	2,6
148	747473,10	7143701,23	2,0

TABELA 13. VALORES INICIAIS PARA PARÂMETROS DE AJUSTAMENTO DO
BLOCO

NRO FOTO	NRO PTO	COLUNA	LINHA
1	1	1480	130
1	2	1410	130
1	3	1108	176
1	4	1048	205
1	5	660	220
1	6	1847	233
1	7	2207	245
1	8	277	282
1
2	1	1433	944
2	2	1360	950
2	3	1048	976
2	4	986	1004
2	5	588	1000
2	6	1799	1058
2	7	2159	1077
2	8	195	1044
2	9	1929	1143
2	10	613	1103
2
2	38	648	708
2	39	2278	705
2	40	1873	740
2	41	1052	761
2	42	1477	1108

É sabido que as coordenadas de cada ponto lido na imagem estão ligadas às de terreno pelo modelo da equação de colinearidade (Eq. 9)

Dessa forma, se os 148 pontos (138 de ligação entre imagens contíguas e 10 pontos de controle) foram lidos nas fotos gerando 375 observações e cada observação resulta um par de equações como as do modelo, então o sistema de equações a resolver terá 750 equações.

Ainda, os 10 pontos de controle geram 30 equações de injunção, 3 para cada ponto de controle, do tipo $X_{139} = 747169,38$; $Y_{139} = 7142202,51$ e $Z_{139} = 2,8$, por exemplo.

Serão no total 780 equações.

Por sua vez, o bloco está constituído de 11 fotos e são 6 parâmetros de orientação por foto, resultando 66 incógnitas. Mas, cada um dos pontos lidos deve ter suas coordenadas tridimensionais estimadas no espaço objeto, sendo, pois, mais 444 incógnitas. No total 510 incógnitas.

O sistema de equações não linear e não homogêneo gerado terá dessa forma (780 equações – 510 incógnitas) 270 graus de liberdade. Resolver esse sistema exige a aplicação do ajustamento por mínimos quadrados, método paramétrico com injunção de posição, iterativamente até a convergência para as posições dos centros perspectivos e dos ângulos de orientação ($X_o, Y_o, Z_o, K, \Phi, \Omega$). Esse processo pode ser visto com detalhes em Andrade (1998). Uma implementação na linguagem ambiente interpretada do MatLab foi utilizada e o resultado dessa aerotriangulação, ou seja, a estimativa dos parâmetros de orientação exterior de cada foto, está apresentado na tabela 14 e na tabela 15 às respectivas precisões associadas.

Concluída essa etapa, segundo o clássico processo fotogramétrico, a estrutura *orientação exterior* do fluxograma da Figura 57 estará completa e resta, naquela seqüência de procedimentos, calcular os limites de cada imagem no terreno.

TABELA 14. PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DAS FOTOS

NRO FOTO	COORD E X_o	COORD N Y_o	H Z_o	OMEGA	PHI	KAPPA
1	747041,60	7142211,35	589,07	2,4022	-0,9820	334,2153
2	747108,52	7142359,48	589,71	2,0560	-2,5165	336,2213
3	747171,36	7142498,92	590,65	2,6294	-0,5817	335,3383
4	747233,07	7142638,96	590,97	3,0392	-0,0359	336,0072
5	747294,47	7142776,08	590,80	2,6669	-0,7687	335,1612
6	747355,54	7142910,73	590,68	2,7258	-1,4266	335,5257
7	747416,42	7143044,12	591,58	3,1229	-0,3527	334,9071
8	747479,79	7143180,09	591,03	2,7367	-0,9645	334,7349
9	747541,22	7143315,43	591,26	2,5489	0,1616	335,4066
10	747602,16	7143448,52	590,14	3,0071	0,2636	334,7348
11	747664,92	7143583,01	589,24	3,2387	-0,1503	335,2600

TABELA 15. PRECISÃO DOS PARÂMETROS ESTIMADOS NA TABELA 14

NRO FOTO	σ_E	σ_N	σ_H	σ_{OMEGA}	σ_{PHI}	σ_{KAPPA}
1	1,0068	0,8377	0,1481	0,1429	0,1468	0,0258
2	0,7434	0,4192	0,1392	0,0849	0,1205	0,0254
3	0,6457	0,4023	0,1294	0,0798	0,1113	0,0224
4	0,5294	0,4440	0,1267	0,0847	0,0976	0,0222
5	0,5314	0,3768	0,1281	0,0764	0,0989	0,0196
6	0,7387	0,4186	0,1186	0,0856	0,1266	0,0198
7	0,7307	0,5161	0,1249	0,0991	0,1279	0,0210
8	0,9950	0,5932	0,1828	0,1103	0,1618	0,0269
9	1,1016	0,6313	0,2014	0,1134	0,1743	0,0291
10	1,3932	0,7564	0,2362	0,1333	0,2076	0,0378
11	1,6708	1,1547	0,3038	0,1803	0,2399	0,0489

4.2.3. Determinação da área de abrangência de cada imagem

Calcular os limites de cada imagem no terreno significa projetar o retângulo envolvente de cada imagem sobre o espaço objeto.

Esse é um expediente importante para otimizar algumas das rotinas seguintes, quando será fundamental determinar em que imagem cada lote do terreno está retratado. O modelo matemático utilizado para esse fim é a equação da colinearidade inversa, o mesmo utilizado nos sistemas monorrestituídos explorados, por exemplo, em Mitishita (1997):

$$\begin{aligned} X &= X_o + (Z - Z_o) \frac{(\cos \Phi \cos K).x + (\cos \Phi \sin K).y + (\sin \Phi).f}{(\sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K).x + (\sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K).y + (\cos \Omega \cos \Phi).f} \\ Y &= Y_o + (Z - Z_o) \frac{(\cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K).x + (\cos \Omega \cos K - \sin \Omega \sin \Phi \sin K).y + (\sin \Omega \cos \Phi).f}{(\sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K).x + (\sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K).y + (\cos \Omega \cos \Phi).f} \end{aligned} \quad (48)$$

É notório perceber que X e Y são as coordenadas dos pontos no referencial geodésico e podem ser calculadas em função das coordenadas de imagem, dos parâmetros da tabela 14, da distância focal calibrada f (estrutura de dados da câmara) e da coordenada do terreno Z . Ainda, que Z é função de X e Y , portanto, a princípio desconhecido.

A solução para o sistema, adotada em todo processo de monorrestituição, é iterativa. Parte-se de uma altitude média Z_1 e calcula-se $X_1 Y_1$. No MNDT disponível verifica-se o valor da altitude para $X_1 Y_1$, um Z_2 . Aplica-se novamente a equação 48 com o novo valor Z_2 e obtém-se $X_2 Y_2$. Compara-se $X_2 Y_2$ com $X_1 Y_1$ e se as diferenças estiverem menores que uma tolerância arbitrada adota-se esse valor como solução. Caso contrário repete-se o processo até essa condição ser verdadeira.

Uma implementação dessa rotina foi efetuada, no ambiente do MatLab, e o resultado está apresentado na tabela 16. Cada ponto está associado a um vértice da imagem, cujas coordenadas no referencial fotogramétrico, em mm, podem ser obtidas facilmente considerando os quatro pontos extremos de uma chamada área útil da imagem, com sugere a Figura 66.

A idéia de utilizar a área reduzida de uma margem está associada ao fato de que nessa faixa os efeitos da visada perspectiva podem afetar muito o desempenho dos algoritmos de comparação de forma, como será devidamente exemplificado mais tarde. Na prática essa tolerância foi adotada como 10% do tamanho do CCD.

FIGURA 66. OS PONTOS LIMITES DA ÁREA ÚTIL DA IMAGEM UTILIZADOS PARA CÁLCULO DA ABRANGÊNCIA DA IMAGEM NO TERRENO.

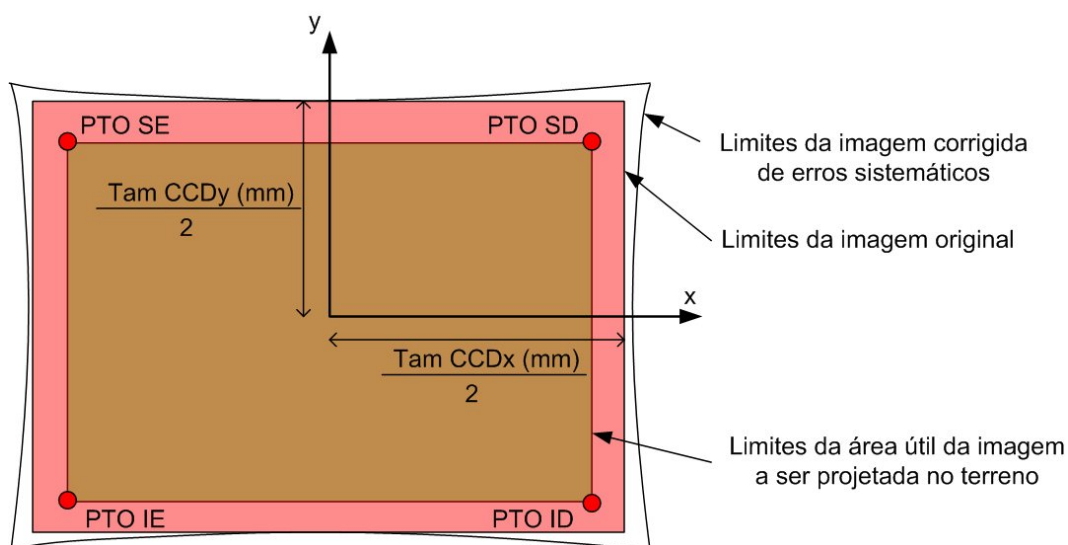


TABELA 16. LIMITES NO TERRENO DE ALGUMAS FOTOS DO VÔO MATINHOS

Coord E (m)	Coord N (m)	Valor Aprox H (m)
Foto 1: DSC06030		
746745,65	7142170,50	3,00
746910,97	7142526,70	3,00
747385,98	7142306,30	3,00
747220,66	7141950,10	4,00
Foto 2: DSC06031		
746829,64	7142304,00	3,00
746988,31	7142670,60	2,00
747477,23	7142459,10	3,00
747318,56	7142092,40	3,00
Foto 3: DSC06032		
746874,45	7142460,40	3,00
747037,94	7142815,20	2,00
747510,99	7142597,20	3,00
747347,50	7142242,40	3,00

4.3. O Modelo de Análise de Imagens

Analisar uma imagem é dela extrair informações geométricas, topológicas, lógicas e/ou semânticas, conforme discutido sumariamente na introdução do tópico 3.2 e apresentado segundo modelo específico em 3.2.7.

No caso do estudo aqui abordado as cenas retratam paisagens urbanas. As imagens são fotos verticais de levantamentos aéreos com grande superposição e processadas inicialmente como mostrado no item anterior. É compatível com o objetivo proposto, uma base cartográfica digital da área, embora desatualizada, está disponível. É manifesto o fato de que, comparado à pura interpretação, determinar se uma imagem está ou não retratando um dado vetorial correlato, resultante da prévia interpretação humana, é um problema bem parametrizado com muitas injunções que, a priori, sugere reais possibilidades de aplicação com bons resultados. Em suma, é um desafio bem menos pretensioso do que partindo única e exclusivamente de uma imagem orientada determinar se um objeto está ou não presente, sua vizinhança, sua funcionalidade na cena.

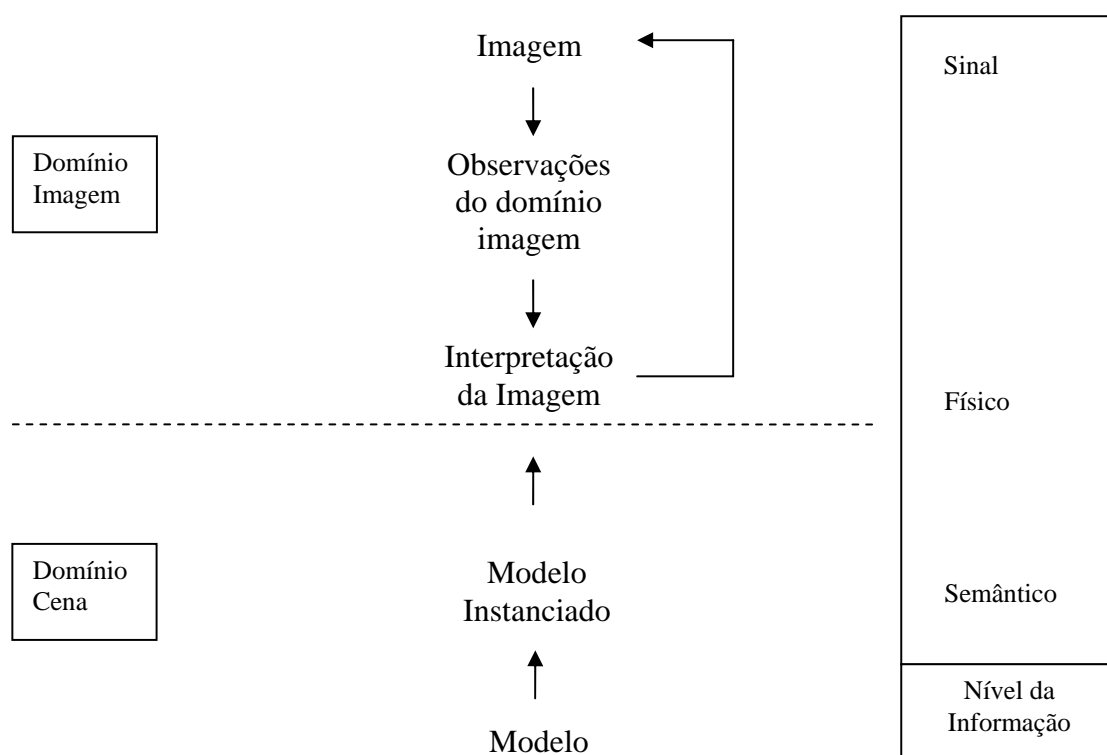
O modelo de análise e interpretação que será, pois, utilizado é uma adaptação daquele proposto por Kanade (1980), como já se disse em 3.2.7. Aquele é essencialmente cíclico. O processo inicia na imagem e chega a um modelo da cena; constrói uma nova imagem baseada no modelo e a compara com a imagem inicial; ajusta o modelo, reconstrói a imagem e assim até uma dada convergência, quando o modelo não mais se altera.

No caso da metodologia aqui adaptada, o processo parte simultânea e independentemente de dois objetos: a foto e a cartografia. Observe-se o diagrama da Figura 67.

O que se tem em mente aqui é a comparação de objetos de uma cena, representados por primitivas geométricas (cartografia digital), com objetos apresentados como um conjunto de píxeis seletivamente conectados por critérios de vizinhança e atributos (regiões da imagem). As opções para realização de uma métrica de similaridade entre as representações são, obviamente:

- (a) efetuar a comparação no domínio da cena, mediante a modelagem das observações no domínio da imagem por primitivas geométricas;
- (b) efetuar a comparação no domínio da imagem, mediante a síntese matricial dos objetos modelados no domínio da cena;
- (c) efetuar a comparação mantendo a representação de cada objeto em seu domínio original.

FIGURA 67. MODELO DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS UTILIZADO



Concretamente, em (a), modelam-se e simplificam-se os contornos dos objetos segmentados e classificados na imagem, ajustando-se uma poligonal para a seguir comparar matematicamente os parâmetros dessa poligonal com a representação cartográfica. Ou, em (b), como função da representação cartográfica deve-se construir uma imagem da cena e comparar essa imagem, utilizando ferramentas de correlação, com a obtida fotograficamente. Ou, finalmente, em (c), deve-se desenvolver uma métrica

que permita comparar diretamente os píxeis da imagem segmentada e classificada com os polígonos da representação cartográfica.

Antes da apresentação do tipo de solução escolhido, um aspecto fundamental da metodologia será aqui convenientemente apresentado.

Quando se observa a imagem de uma cena urbana sua complexidade é evidente. São múltiplas cores, texturas e formas. São objetos naturais e outros construídos pelo homem, imiscuídos. A vegetação é esparsa, porém freqüente. Vegetação rasteira, arbustos e árvores estão dispersas em praças, jardins, canteiros e nos quintais das casas. Freqüente também são áreas de preservação, parques e margens de cursos d'água onde o verde costuma ser denso e contínuo.

As construções, em suas plantas, costumam ter formas que associam linhas retas. Os telhados são construídos em diversas topologias, predominantemente com telhas de fibro-cimento e de barro. Porém, também são utilizados esmaltados, telhas metálicas e mesmo o concreto, em casos onde lajes superiores ficam expostas. Algumas áreas costumam ser pavimentadas, como a rede viária, as calçadas e parte dos lotes. Também grandes áreas de solo exposto aparecem, nas vias suburbanas, nas praças, nos terrenos sem uso, nas obras e mesmo nos lotes habitados. Há também os elementos de infra-estrutura, torres, postes, sistema de coleta e escoamento de água da chuva, centros esportivos, estádios, áreas de recreação. E ainda os veículos, em movimento, estacionados, guardados dentro dos lotes. Ou seja, são múltiplos e variados objetos ocupando o espaço geográfico.

Porém, não é totalmente aleatória a colocação desses objetos no meio. Há uma hierarquia evidente, uma topologia própria que é facilmente identificada pelo olhar humano, e que deve ser transferida ao sistema automático de reconhecimento. O espaço urbano está organizado de forma a permitir a ocupação racional do território e o movimento das pessoas. O espaço urbano é funcional por natureza. Mais ou menos, conforme a capacidade das pessoas de gerir esse espaço. Porém, sempre funcional. Idealmente, alguém que edifica sua moradia, o faz ciente de que terá acesso

a uma infra-estrutura mínima para manter saudável seu viver e isso indica acesso à energia, a água potável, a um sistema de esgotamento da água da chuva. Sabe ainda que poderá exercer seu direito de ir e vir.

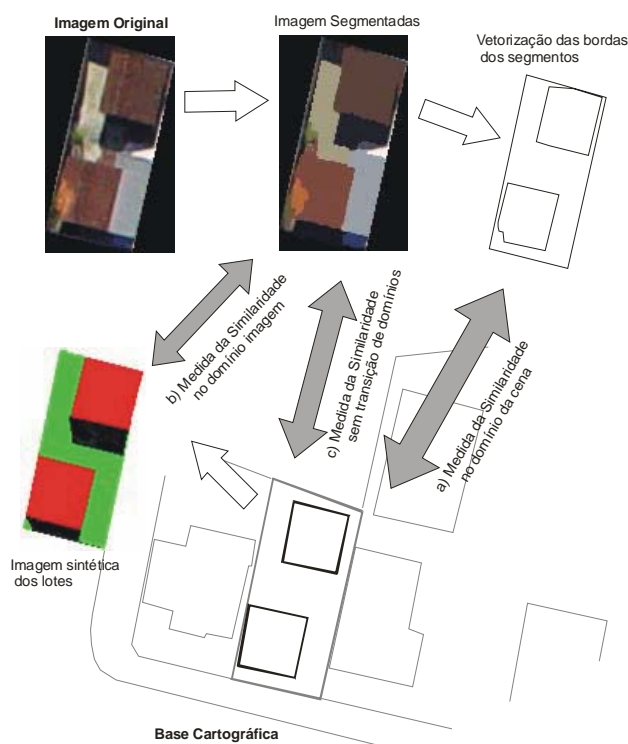
Essa análise do espaço urbano está intimamente ligada à estrutura viária e à presença dos quarteirões no desenho das cidades. As pessoas têm propriedade e/ou posse de parcelas de território onde habitam: os lotes. Esses lotes são agrupados em conjuntos justapostos, os quarteirões, que são entremeados por logradouros (avenidas, ruas, travessas, becos, praças, largos, pontes, viadutos ...). Embora um pouco prolixa essa argumentação visa atentar ao seguinte aspecto: o extremamente complexo contexto das áreas urbanas, composto de um grande número de objetos das mais diversas classes possui uma organização espacial hierárquica simples donde se destacam os lotes.

E é dentro dos lotes que está o maior esforço de atualização cadastral. Os lotes são as regiões mais dinâmicas, é onde a população exerce seu direito de habitar, é ambiente adaptável e que está em constante mudança. O traçado viário, uma vez consolidado, dificilmente se altera e quando se altera é devido à ação controlada do estado, planejada, projetada, desenhada, conhecida e passível de ação de manutenção cartográfica imediata.

Em atenção a esse detalhe, nesse trabalho, todo o processo de análise de imagens estará fundado na área do lote. Isso simplifica substancialmente o problema pela redução drástica do domínio. Como as imagens estão orientadas segundo o mesmo referencial da base cartográfica existente, as posições dos lotes nas imagens podem ser facilmente obtidas e nelas estão as áreas de maior probabilidade de mudança. As medidas de similaridades entre objetos serão aí efetuadas, lote a lote.

Então, retornando as opções de métrica de similaridade, considerando as formas de representações, atente-se para a ilustração da Figura 68.

FIGURA 68. UM LOTE REPRESENTADO NO DOMÍNIO DA CENA E DA IMAGEM. AS ALTERNATIVAS DE MEDIDA DE SIMILARIDADE ENTRE OS OBJETOS.



A imagem foi recortada da foto original em função do conhecimento da geometria do lote na base cartográfica. O processo de análise agora deve restringir-se a observar o lote. No caso em questão deve-se verificar se a imagem apresenta as duas edificações tais como presentes na base cartográfica. O que é trivial observar para a visão humana é relativamente complexo para um sistema automático.

As três alternativas de medida da similaridade estão representadas e é simples identificar os objetos e domínios apresentados na Figura 67 em 68.

A alternativa metodológica em descrição vem sendo nesse texto explorada lógica e seqüencialmente. No entanto, a pesquisa cronologicamente se apoiou no estudo preliminar das propriedades da Distância de Hausdorff, definida para conjuntos discretos de pontos e presumido seu potencial de aplicação como métrica para esse problema. Desde já se afirma que tal Distância de Hausdorff pode ser utilizada com sucesso na medida da similaridade para quaisquer das alternativas

apresentadas. A decisão sobre qual utilizar esteve fundamentada apenas em função da eficiência dos algoritmos, mas isso será tratado mais tarde. Cabe, no entanto, deixar claro que a opção final recaiu sobre comparação no domínio imagem e a seqüência da metodologia estará relacionada à essa decisão.

4.4. O processamento visando à análise das imagens

4.4.1. Fluxogramas de processamento

Nas figuras 69, 70, 71 e 72 estão os fluxogramas dos processos associados e desenvolvidos no âmbito dessa pesquisa para solução do problema proposto. Nos próximos tópicos desse capítulo estarão sendo detalhados elementos desses fluxogramas para melhor entendimento da metodologia adotada.

FIGURA 69. FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRINCIPAL: DA ENTRADA DE DADOS À DECISÃO.

Proc. Principal - Chamadas as rotinas e decisão

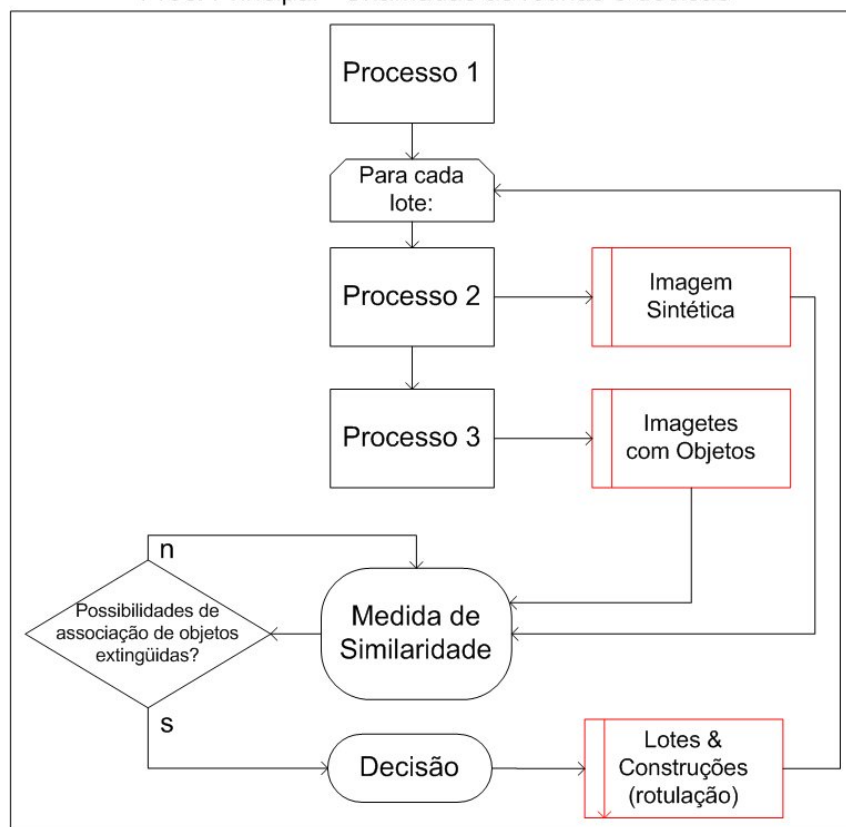


FIGURA 70. FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DOS DADOS: EXTRAÇÃO DOS LOTES DA BASE, CARACTERIZAÇÃO E PERTINÊNCIA NO CONJUNTO DE IMAGENS.

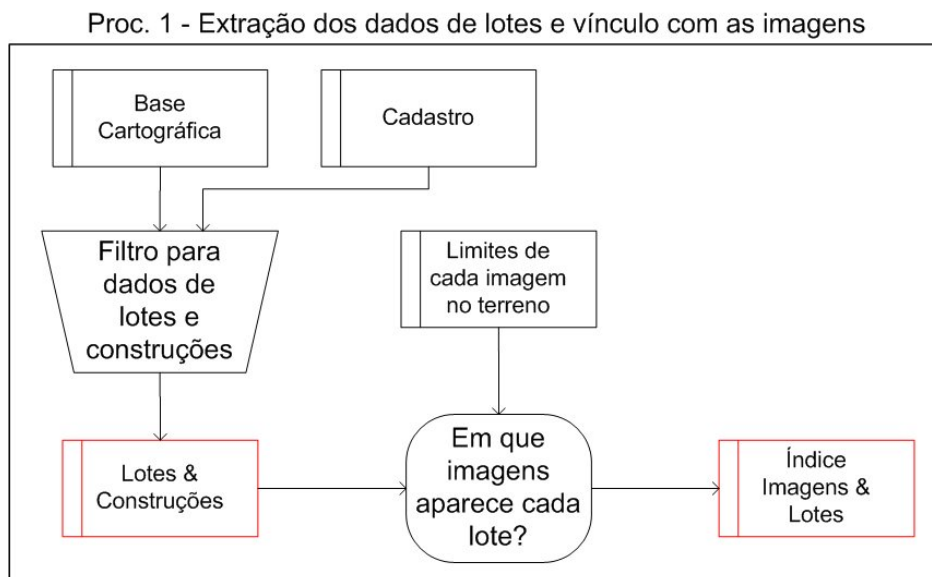


FIGURA 71. FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS SINTÉTICAS DOS LOTES.

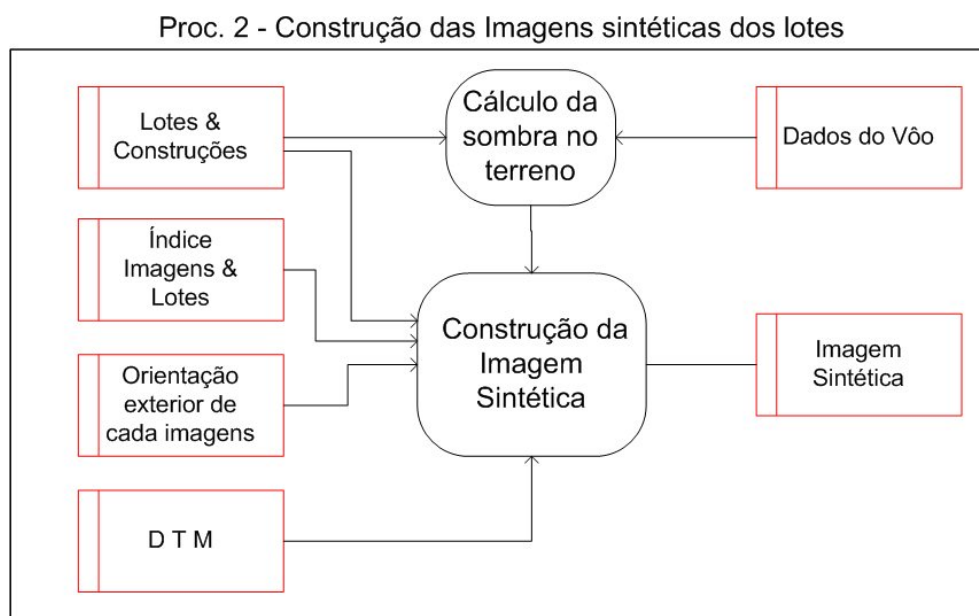
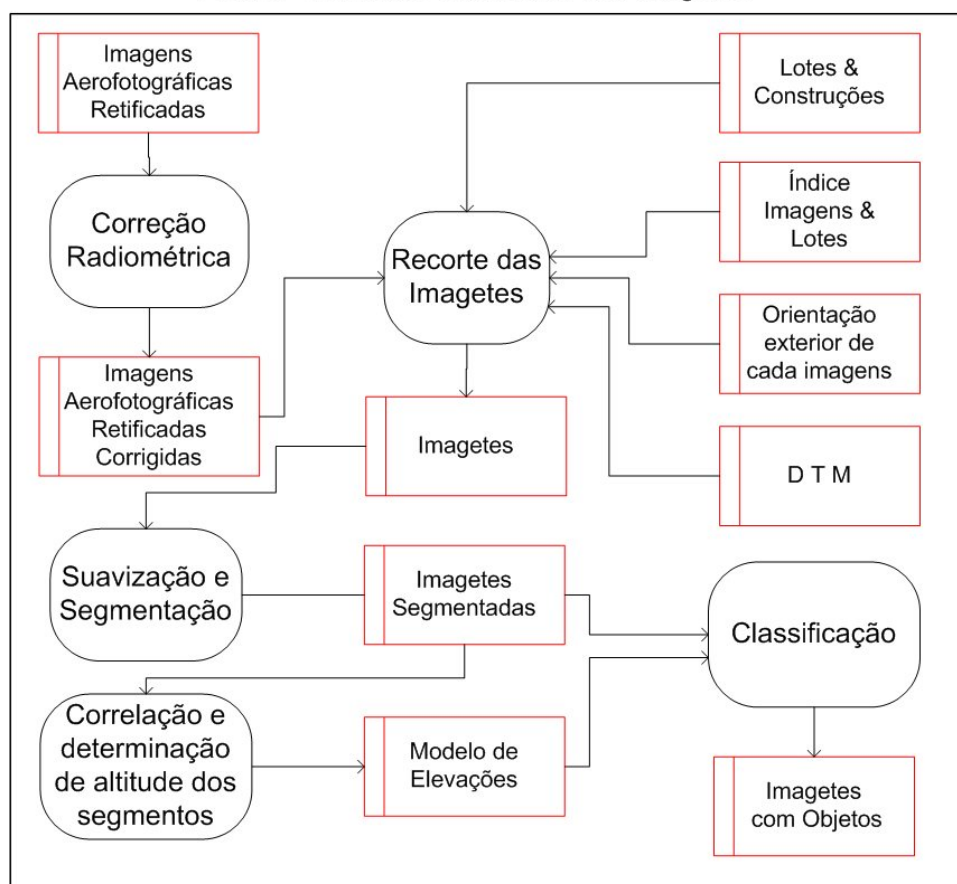


FIGURA 72. FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS: DO RECORTE DAS IMAGETES À CARACTERIZAÇÃO DOS OBJETOS.

Proc. 3 - Recorte e tratamento das imagetes



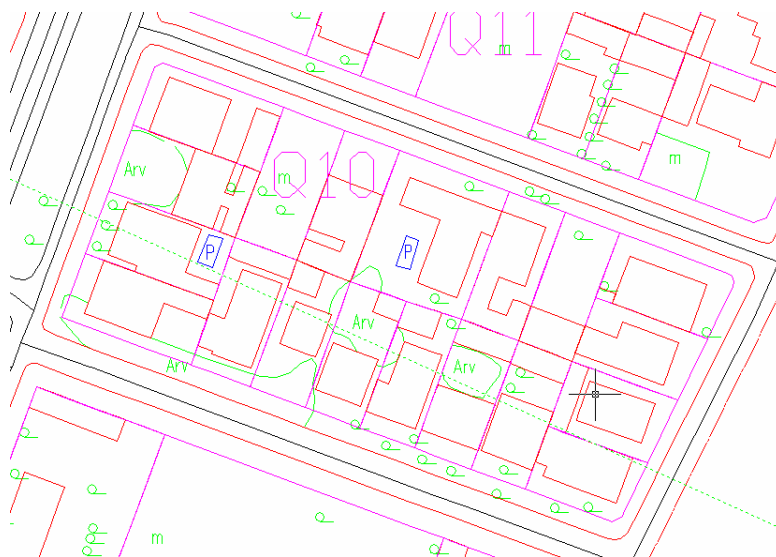
4.4.2. Formação das estruturas *lotes e construções* e vínculo lotes-imagens

Entender que todo o processamento será efetuado ao nível de lote, iterativamente até que toda a área mapeada tenha sido verificada, torna clara a abordagem inicial apresentada no fluxograma da Figura 69.

Da base cartográfica, com seus múltiplos *layers* (como comumente na linguagem dos SIGs se chamam os planos de informação) serão extraídos somente dois: limites dos lotes e construções. Não é incomum aparecer *layers* para determinadas classes de prédios, como escolas, postos de saúde, postos de segurança, indústrias e edifícios públicos, entre outros. Nesse caso todos deverão ser integrados a um único, o das construções.

A fim de organizar o processo de análise, o banco de dados com as informações desses *layers* analisado por uma instrução SQL (Structured Query Language, linguagem padrão para consulta a banco de dados) para seleção das entidades associadas por quarteirão, e geração de arquivos independentes no formato DXF (Drawing Exchange File Format). A Figura 73 apresenta os dados cartográficos do quarteirão 10 da área de Matinhos.

FIGURA 73. O QUARTEIRÃO 10 DA BASE CARTOGRÁFICA DE MATINHOS



Quando os dados associados a esses gráficos são exportados desde o sistema AutoDesk Map®, para os lotes do quarteirão 10 será gerado um arquivo cuja aparência será:

```
POLYLINE Layer: "LOTES_FECHADOS"
  Space: Model space
  Color: BYLAYER Linetype: "01"
  Handle = CD153
  Closed
  starting width  0.0000
  ending width  0.0000
  area 444.1548
  perimeter 88.4153
VERTEX Layer: "LOTES_FECHADOS"
  Space: Model space
  Handle = CD154
  at point, X=747663.4800 Y=7143556.3300 Z= 0.0000
  starting width  0.0000
  ending width  0.0000
VERTEX Layer: "LOTES_FECHADOS"
  Space: Model space
  Handle = CD155
```

```

        at point, X=747637.1000 Y=7143566.1400 Z= 0.0000
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
    VERTEX Layer: "LOTES_FECHADOS"
        Space: Model space
        Handle = CD156
        at point, X=747635.2200 Y=7143565.2300 Z= 0.0000
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
    VERTEX Layer: "LOTES_FECHADOS"
        Space: Model space
        Handle = CD157
        at point, X=747630.4600 Y=7143552.4400 Z= 0.0000
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
    VERTEX Layer: "LOTES_FECHADOS"
        Space: Model space
        Handle = CD159
        at point, X=747663.4800 Y=7143556.3300 Z= 0.0000
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
    END SEQUENCE Layer: "LOTES_FECHADOS"
        Space: Model space
        Handle = CD15A
    POLYLINE Layer: "LOTES_FECHADOS"
        Space: Model space
        Color: BYLAYER Linetype: "01"
        Handle = CD15B
        Closed

```

Se os dados exportados são os das construções, surge:

```

    POLYLINE Layer: "EDIF_RES"
        Space: Model space
        Color: BYLAYER Linetype: "01"
        Handle = CD91E
        Closed
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
        area 182.9688
        perimeter 54.2324
    VERTEX Layer: "EDIF_RES"
        Space: Model space
        Handle = CD91F
        at point, X=747634.0000 Y=7143551.1500 Z= 0.0000
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
    VERTEX Layer: "EDIF_RES"
        Space: Model space
        Handle = CD920
        at point, X=747647.6100 Y=7143546.2000 Z= 0.0000
        starting width 0.0000
        ending width 0.0000
    VERTEX Layer: "EDIF_RES"
        Space: Model space

```



```

Handle = CD921
at point, X=747651.9700 Y=7143558.0300 Z= 0.0000
starting width 0.0000
ending width 0.0000
VERTEX Layer: "EDIF_RES"
Space: Model space
Handle = CD922
at point, X=747638.3800 Y=7143563.0300 Z= 0.0000
starting width 0.0000
ending width 0.0000
VERTEX Layer: "EDIF_RES"
Space: Model space
Handle = CD923
at point, X=747634.0000 Y=7143551.1500 Z= 0.0000
starting width 0.0000
ending width 0.0000
END SEQUENCE Layer: "EDIF_RES"
Space: Model space
Handle = CD924

```

Um programa de localização e filtragem das informações relevantes (coordenadas dos vértices dos objetos) foi implementado para resultar nas estruturas de dados relacionais mostradas nas tabelas 17 e 18.

TABELA 17. DADOS FILTRADOS PARA OS LOTES.

Quarteirão	Lote	Vértices		
		Número	Coord E	Coord N
10	1	1	747663,48	7143556,33
		2	747637,10	7143566,14
		3	747635,22	7143565,23
		4	747630,46	7143552,44
		5	747658,28	7143542,33
		1	747663,48	7143556,33
	2	1	747658,28	7143542,33
		2	747630,46	7143552,44
		3	747625,08	7143537,98
		4	747652,88	7143527,94
		1	747658,28	7143542,33
	3	1	747625,08	7143537,98
		2	747619,97	7143524,41
		3	747648,11	7143514,11
		4	747652,88	7143527,94
		1	747625,08	7143537,98
	4	1	747619,97	7143524,41
		2	747614,87	7143510,52
		3	747643,20	7143500,00
		4	747648,11	7143514,11
		1	747619,97	7143524,41
	...	1
		

TABELA 18. DADOS FILTRADOS DAS EDIFICAÇÕES.

Quarteirão	Lote	Edificação	Vértices		
			Número	Coord E	Coord N
1	1	1	1	747634,00	7143551,15
			2	747647,61	7143546,20
			3	747651,97	7143558,03
			4	747638,38	7143563,03
			1	747634,00	7143551,15
		2	1	747658,28	7143542,33
			2	747662,72	7143554,29
			3	747657,51	7143556,16
			4	747653,20	7143544,17
			1	747658,28	7143542,33
	2	1	1	747644,20	7143547,44
			2	747653,00	7143544,24
			3	747650,63	7143537,72
			4	747652,40	7143537,07
			5	747654,78	7143543,60
			6	747658,28	7143542,33
			7	747652,88	7143527,94
			8	747649,51	7143529,16
			9	747651,37	7143534,28
			10	747649,65	7143534,90
			11	747647,79	7143529,78
			12	747638,94	7143532,98
			1	747644,20	7143547,44
	3	1	1	747648,11	7143514,11
			2	747630,79	7143520,46
			3	747631,27	7143521,76
			4	747624,87	7143524,15
			5	747629,21	7143535,78
			6	747645,50	7143529,70
			7	747642,00	7143520,33
			8	747649,30	7143517,60
			1	747648,11	7143514,11
	4	1	1	747624,13	7143522,89
			2	747648,11	7143514,11

Nessa fase de preparação dos dados, dois outros campos, associados a altimetria, serão agregados as estruturas das tabelas 17 e 18: a altitude média do lote e a altura aproximada da edificação. A altitude aproximada do lote é calculada processando a média dos pontos do DTM abrangidos pelo polígono que delimita o lote. A altura aproximada da edificação é calculada como:

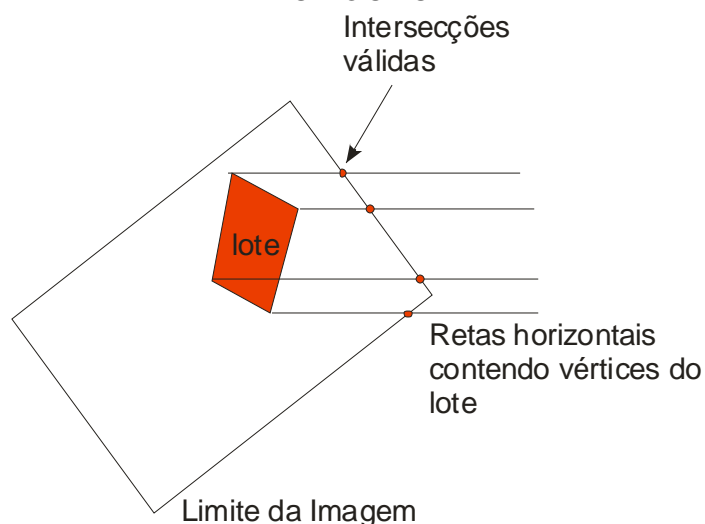
$$H_{constr} = P * NroPav + Elev \quad (49)$$

onde P é o pé direito médio de cada pavimento para região, $NroPav$ o número de pavimentos da construção obtido dos dados do cadastro associado à base

cartográfica e *Elev* à elevação média do telhado sobre o forro do último pavimento. Os valores *P* e *Elev* foram arbitrados em 2 e 1,5 m, respectivamente.

E ainda, finalmente, uma tabela índice relacionando cada lote às imagens onde ele aparece deve ser construída, mediante o cálculo de pertinência do polígono lote (tabela 17) ao polígono imagem (tabela 16). Evidentemente só interessam imagens onde todo o lote esteja incluso. O teste de pertinência será então executado efetuando o teste de inclusão de cada ponto do lote em relação à envoltória da imagem. O clássico algoritmo baseado na intersecção da semi-reta horizontal será utilizado. Recordando, observe-se a Figura 74.

FIGURA 74. ILUSTRAÇÃO DO ALGORITMO DE PERTINÊNCIA DE UM PONTO A UM POLÍGONO



Sempre que uma semi-reta horizontal iniciando no vértice do lote possuir uma única intersecção válida com os limites da imagem, tal vértice estará dentro da imagem. Uma intersecção válida é aquela que pertence aos segmentos que formam o polígono e cuja abscissa é maior que a do próprio ponto. Alguns tratamentos de exceções também devem ser previstos, como o caso de retas que passam por vértices, ou são coincidentes com as arestas, ou o ponto testado está sobre o polígono ou em um de seus vértices. Mas esses casos são facilmente resolvidos por testes diretos. Mais detalhes podem ser vistos, por exemplo, em Foley (1990).

É claro que não se faz necessário aplicar o algoritmo a todas as imagens. Um filtro baseado na distância euclidiana entre a coordenada média do lote e da imagem é utilizado para selecionar somente as 6 imagens mais próximas e dessas somente as duas mais próximas serão indexadas. A tabela 19 é um pequeno trecho do índice imagem & lotes.

TABELA 19. ÍNDICE DE IMAGENS ASSOCIADAS AOS LOTES

Quarteirão	Lote	Foto 1	Foto 2
10	1	DSC06039	DSC06040
	2	DSC06039	DSC06040
	3	DSC06039	DSC06040
	4	DSC06039	DSC06040
	5	DSC06039	DSC06040

Se determinado lote não aparece no mínimo em duas imagens ele será automaticamente selecionado como indeterminado, significando que o sistema automático não teve condições de estimar sua compatibilidade cartografia-imagem.

4.4.3. Construção das imagens sintéticas dos lotes

O mérito do algoritmo apresentado na Figura 71 é aplicar os conceitos expostos em 3.2.9 e 3.2.10, respectivamente, a câmara sintética e a sombra.

A estrutura de dados Lotes & Construções estão conforme as tabelas 17 e 18 e contém a geometria dos objetos a serem projetados no plano de visualização da câmara. Uma simplificação necessária será assumida: os prédios serão sempre prismáticos, pois não se tem informação do formato dos telhados, ou seja, os prédios projetados serão como que sempre cobertos apenas por suas lajes ou forros.

Além dos objetos materiais, a sombra pode conferir importante informação sobre os objetos que se erguem sobre o terreno. Será, pois, também representada.

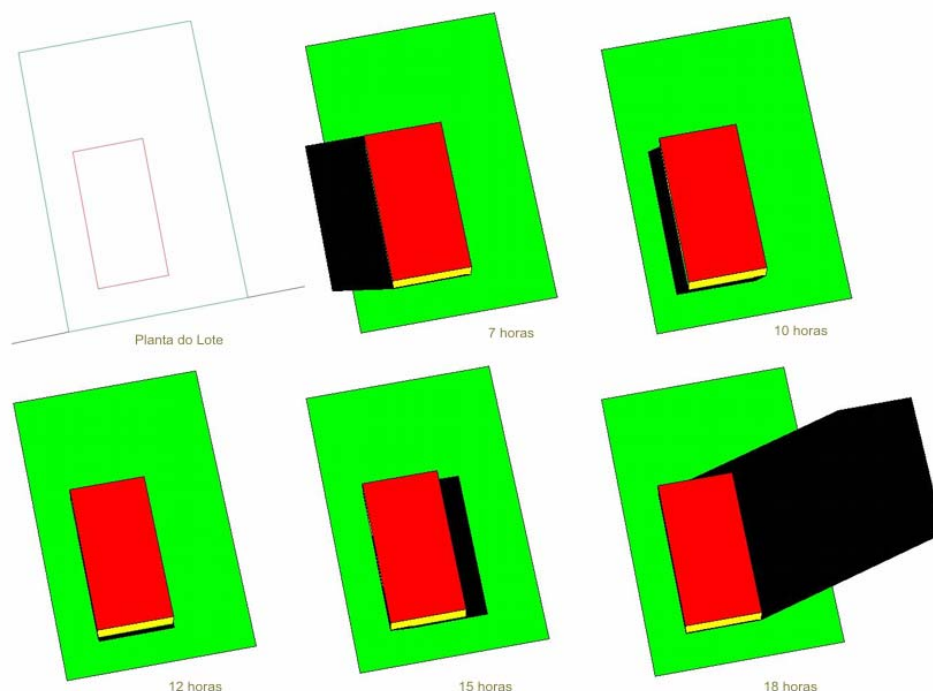
O artifício aqui utilizado para obtê-la é calcular um polígono ao nível do solo cujos vértices são a projeção das faces da construção no terreno segundo ângulo de orientação solar. A implementação da função posição solar de 3.2.10 é trivial e permite estimar os ângulos θ e ϕ (Figura 39) em função de data, hora e das coordenadas aproximadas do voo. Também a projeção paralela de objetos planos não convexos sobre um outro plano é muito simples, e o resultado será uma aproximação do que deve ser a sombra presente na imagem se os objetos sobre o terreno continuam os mesmos.

Modelados todos os objetos no sistema de coordenadas de mundo real (referencial geodésico), serão esses tratados segundo a geometria projetiva do algoritmo da câmara sintética. A posição da câmara e sua orientação serão aquelas obtidas da aerotriangulação para as fotos indexadas ao lote ativo, conforme, respectivamente, as tabelas 14 e 19. As características do plano imagem da câmara sintética serão as mesmas do CCD da câmara efetivamente utilizada.

A Figura 75 apresenta o resultado da simulação obtida para um prédio situado em um lote na cidade de Matinhos no litoral do Paraná para cinco instantes do dia 21 de julho de 2005. O programa foi implementado no MatLab®, inclusive as rotinas para projeção e visualização. Convencionalmente o terreno é preenchido em verde, o teto do prédio em vermelho, suas paredes em amarelo e a sombra em preto.

Essa imagem sintética será a base de comparação com a imagem real para julgamento final sobre as edificações existentes no lote.

FIGURA 75. SIMULAÇÃO DA SOMBRA PRODUZIDA POR UMA CONSTRUÇÃO SIMPLES SOBRE O TERRENO.



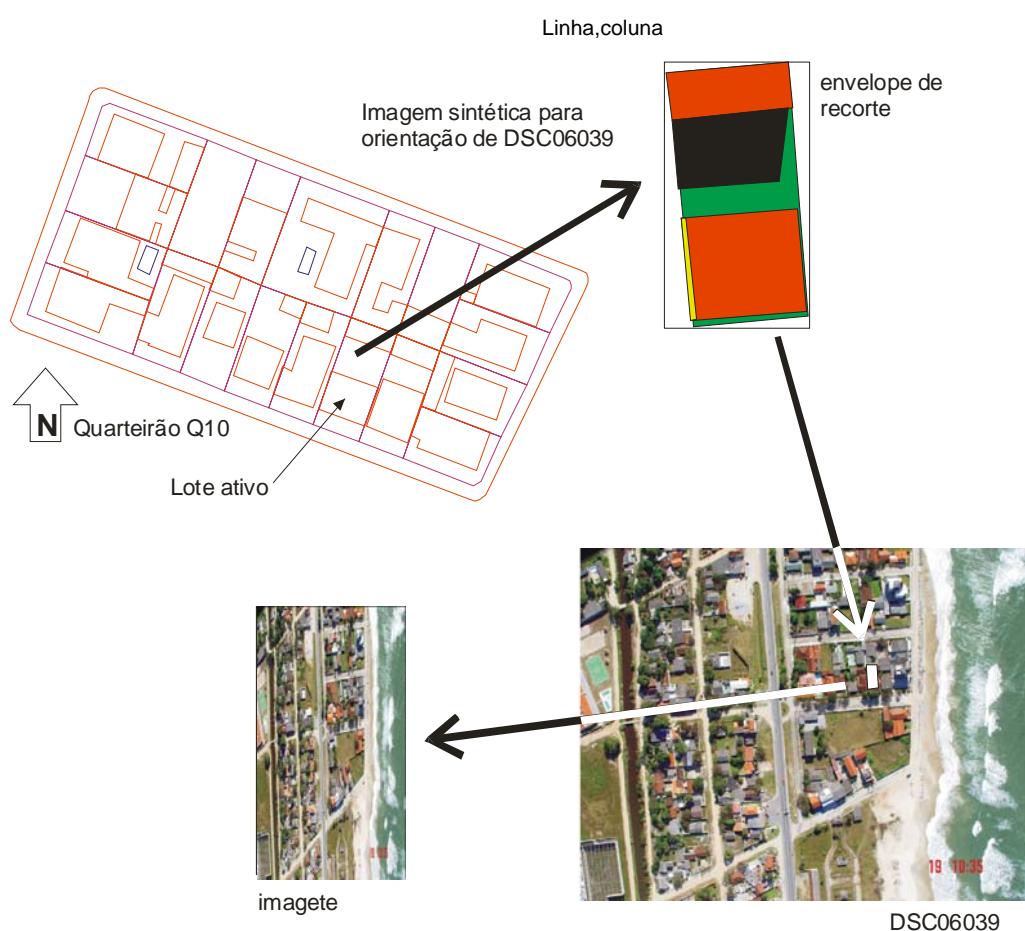
4.4.4. Recorte e tratamento das imagetes

O termo *imagete* está aqui aplicado a fim de designar uma pequena porção da imagem fotográfica, limitada aproximadamente aos limites de cada lote.

Como explicado no item precedente, a cada lote estão associadas duas imagens, cujos parâmetros de orientação foram determinados num processo de aerotriantulação. A geometria do lote está definida segundo referencial plani-altimétrico, permitindo a aplicação da projeção perspectiva tanto pelo uso do equacionamento da câmara sintética quanto pela equação da colinearidade (equação 9). E, nesse ponto da metodologia, tal procedimento já foi executado para geração da imagem sintética. Resta então tomar as coordenadas projetadas do polígono lote e efetuar o recorte nas respectivas imagens aerofotográficas.

Embora a partir desse recorte somente as imagens sejam alvo do processamento, é importante que a posição do ponto superior esquerdo da janela de recorte em cada imagem original seja registrada, a fim de permitir a aplicação do cálculo de estimativas de altitudes, mediante a técnica de intersecção de raios a partir da detecção de pontos homólogos por correlação das duas imagens. A Figura 68 já ilustrou esse processo. A Figura 76 abaixo é um outro exemplo.

FIGURA 76. ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DAS IMAGETES.



Um detalhe a ser salientado é que antes do recorte, todas as correções radiométricas necessárias, como, por exemplo, as descritas em 3.2.1, já devem ter sido aplicadas.

As imagens assim obtidas serão então submetidas a um processamento que visa ao sucessivo e seletivo agrupamento de píxeis, de

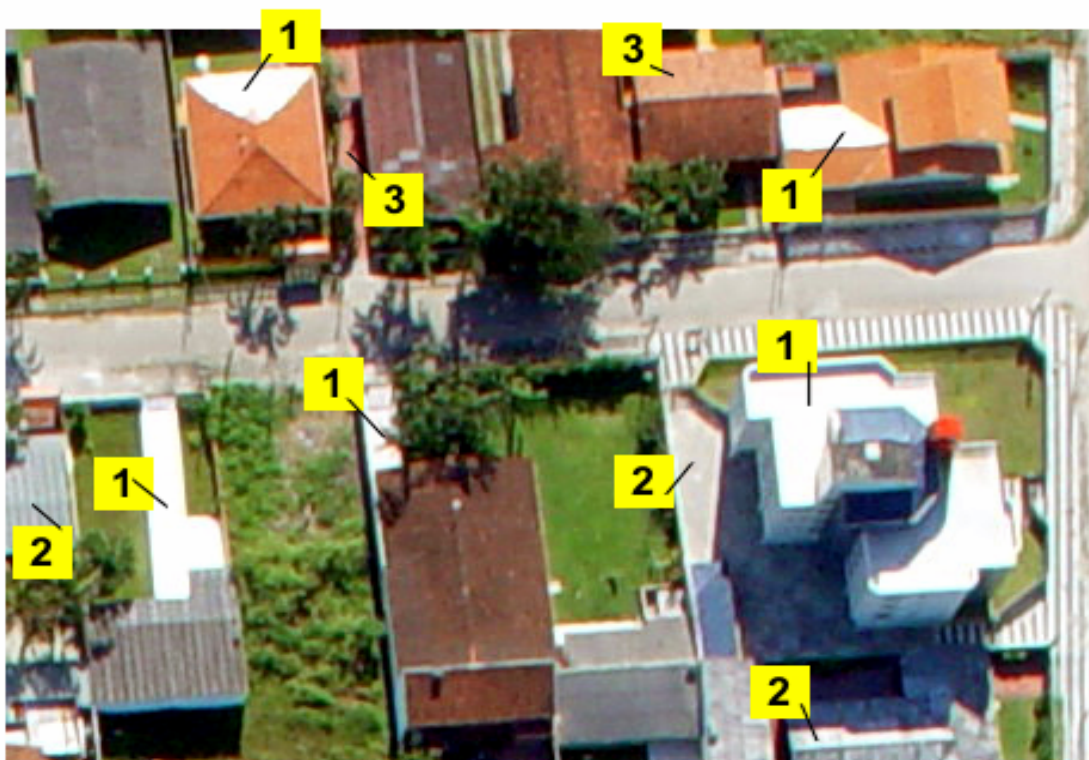
acordo com suas componentes de cores, cada vez mais aproximando a definição das fronteiras entre objetos relevantes.

Nos experimentos realizados três espaços de cores foram explorados em três fases diferentes de processamento. Seguindo o fluxograma do Processo 3, Figura 72, o primeiro passo é a suavização com preservação de bordas, conforme 3.2.2. Esse filtro é aplicado sobre a imagem no espaço de cores original, RGB. Porém, a fim de otimizar a segmentação, a imagem suavizada é convertida para as componentes de cores propostas por Ohta (1980). Essa conversão é bastante simples do ponto de vista operacional, como demonstrado em 3.2.6, e tem a vantagem de aproximar em suas coordenadas as componentes principais da imagem colorida. A segmentação por *Mean Shift* é aplicada e os objetos na imagem que não possuem área suficiente para estarem associados às edificações, ou são agregados por similaridades aos vizinhos ou são assinalados como não relevantes. Seguramente serão eliminados quando da aplicação da simplificação das formas por operadores morfológicos.

Compostos os segmentos relevantes e o sistema retorna à imagem suavizada para amostrar uma cor média para o segmento no espaço RGB, cujas componentes no CIELUV serão também registradas para a classificação.

A classificação baseada somente nas componentes de cores leva a uma série de ambigüidades, em função da variedade de materiais utilizados na construção de telhados e nos pavimentos. A forma dos objetos também não facilita esse reconhecimento, uma vez que os telhados e os pisos de áreas abertas projetam-se com formas similares sobre os lotes, como exemplifica a Figura 77. Porém, agregar a informação de altitude sobre o terreno aos diversos segmentos aumenta em muito a probabilidade de uma classificação correta dos objetos da imagem.

FIGURA 77. AMBIGUIDADES EM RELAÇÃO A TELHADOS E PAVIMENTOS.



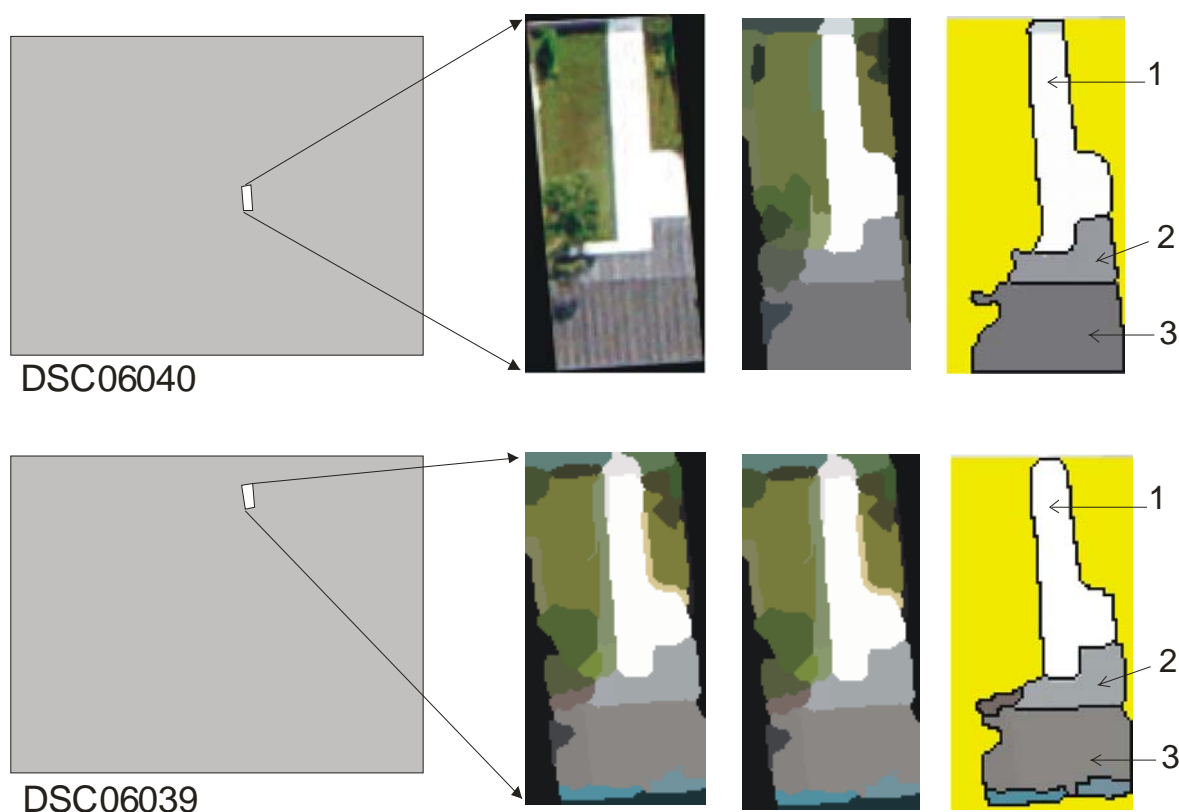
A disponibilidade de dados laser scan, por exemplo, seria uma alternativa bastante promissora. No entanto, a dificuldade em se obter e o custo desse tipo de dados contrasta rigorosamente com o objetivo deste estudo. Assim, incorpora-se nessa fase do processamento um ensaio com correlação entre imagens. E outra vez o fato do espaço limitado, o recorte assistido e orientado pela cartografia, funcionam como o indutor de bons resultados.

A proposta é aplicar o mais elementar dos operadores de correlação cruzada, como explicitado em 3.2.8, ao par de imagetes obtidas para o mesmo lote, como na Figura 78.

Como observamos nas duas imagetes disponíveis, a um observador desavisado, seriam interpretadas como cópia uma da outra. No entanto são recortes de posições distintas de duas imagens aerofotográficas maiores. Ou seja, são perspectivas ligeiramente diferentes da mesma cena, dos mesmos

objetos. E isso sugere, obviamente, o uso do princípio da estereoscopia para determinação da posição tridimensional de pontos.

FIGURA 78. DUAS IMAGETES DO MESMO LOTE, RECORTADAS DA ÁREA DE SOBREPOSIÇÃO DE DUAS FOTOS, SEGUIDAS DE SUA SEGMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES RELEVANTES.



Na metodologia implementada, inicialmente uma classificação preliminar é aplicada, para seleção de todos os segmentos (objetos da imagem) que notoriamente correspondem às classes vegetação, água e sombra. Para tanto, amostras gerais são tomadas e o método baseado na distância de Mahalanobis do espaço de cores CIELUV é utilizado. Dos objetos que sobram são procurados os homólogos nas duas imagetes, basicamente pela proximidade da posição do centróide e pela similaridade de área e cor. A Figura 78, acima, indica essa seqüência.

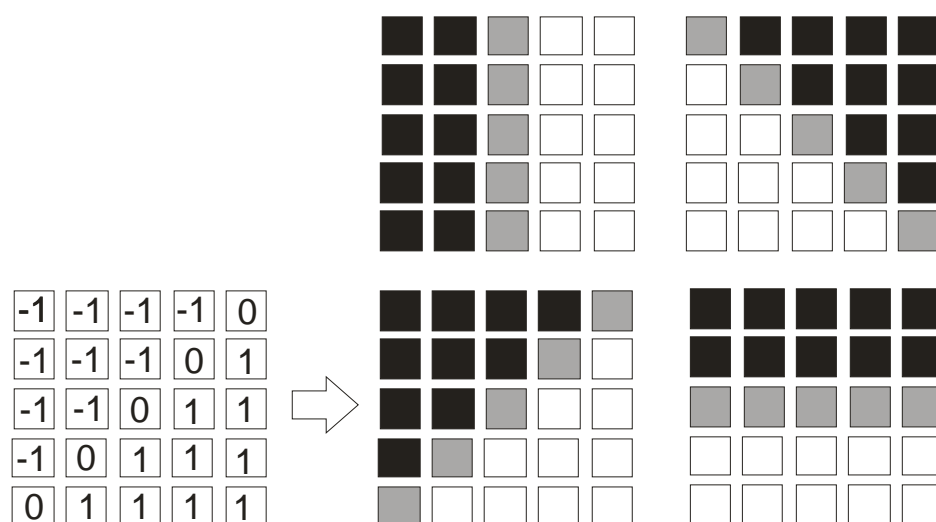
Quando um par de objetos é formado, o sistema efetua a varredura de seus pixels na imagem original (RGB) através de uma janela 5x5 pixels,

especialmente sobre a componente R, adotada como a de maior contraste para uso do método. Todas as posições onde a matriz obtida aprova no critério de reconhecimento são registradas. Esse critério testa basicamente dois aspectos locais: se a variância da matriz está acima de um limite e se não há um padrão que gere facilmente falsos correlatos. Essa verificação não precisa, evidentemente, ser realizada nas duas imagens e aqui se teve o cuidado de escolher aquela que está mais próxima do centro da imagem, onde a deformação dos objetos pelo efeito perspectivo é menor.

O teste de variância evita as áreas muito uniformes, homogêneas, onde não há variação espacial suficiente para que o coeficiente de correlação seja seletivo. O teste de padrão visa eliminar casos onde há variância, porém a configuração da matriz é muito regular, como no caso de pontos nos limites dos segmentos lineares.

O teste de padrão é efetuado simplesmente calculando a correlação da matriz extraída da imagem com os padrões da Figura 79.

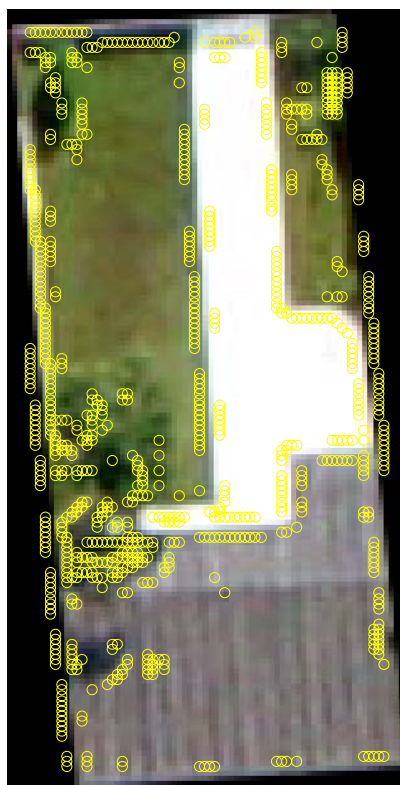
FIGURA 79. PADRÕES QUE DEVEM SER EVITADOS NO PROCESSO DE CORRELAÇÃO



Os pontos resultantes serão os centros das matrizes para localização nas janelas de busca da imagem homóloga. A Figura 80 é um exemplo do

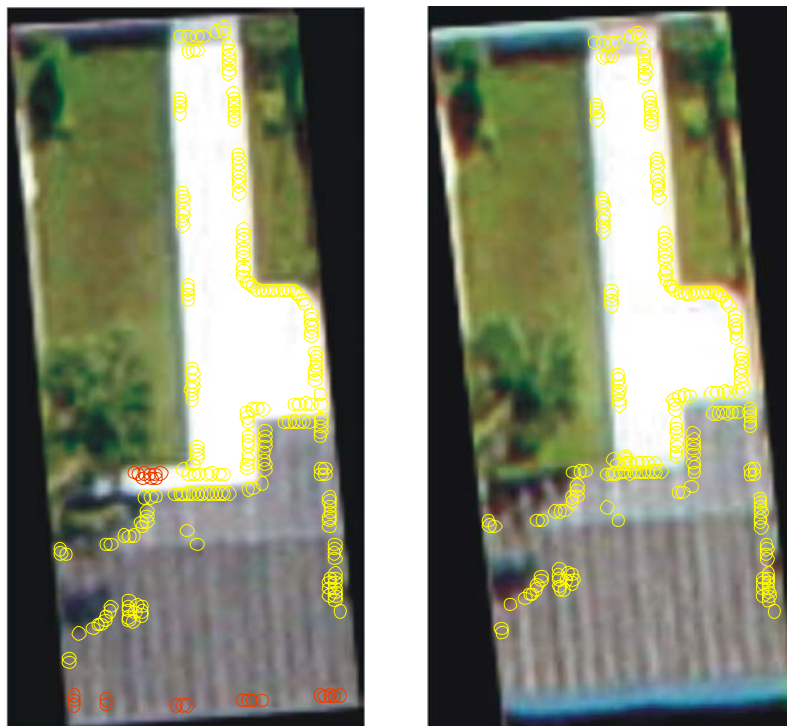
algoritmo de detecção de pontos relevantes para a correlação aplicado em toda a imagem obtida de DSC06040.

FIGURA 80. PONTOS RELEVANTES PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MÁXIMA CORRELAÇÃO CRUZADA NUMA DAS IMAGETES.



Considerando, por exemplo, somente os pontos sobre as regiões 1, 2 e 3 (como na Figura 78), adotando-se uma janela de busca de 25x25 píxeis sobre os pontos da imagem DSC06039 pode-se aplicar a máxima correlação cruzada. Finalmente, identificam-se pares onde o coeficiente de correlação é maior do que um limite (adotado arbitrariamente como 0,85) e aplica-se o modelo apresentado no Capítulo 3, em 3.1.2, pela Equação 10.

FIGURA 81. PONTOS EFETIVAMENTE UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DAS ALTITUDES DEVIDO A SUA ALTA CORRELAÇÃO.



Em relação à Figura 80 resultaram válidos todos os pontos mostrados em 81. Os pontos em vermelho na imagem da esquerda correspondem àqueles eliminados no processo de correlação. Em função do número de pontos resultantes, três procedimentos serão tomados no sentido de atribuir ao objeto um valor de altitude e de confiança nesse valor:

(a) se o número de pontos resultar nulo, o segmento recebe um indicador “indeterminado” para altitude e “nulo” na confiança;

(b) se um pequeno número de pontos resultarem válidos (menos de dez pontos) a altitude é calculada pela média. A confiança será calculada conforme equação 50:

$$conf = ind_{nropontos} * ind_{distpontos} \quad (50)$$

onde $conf$ é o indicador de confiança, $ind_{nropontos}$ e $ind_{distpontos}$ indicadores associados respectivamente ao número de pontos e à distância máxima entre os pontos. O primeiro indicador foi aqui associado a faixas de aceitação conforme a tabela 20 abaixo:

TABELA 20. VALORES PARA INDICADOR DE CONFIANÇA ASSOCIADO AO NÚMERO DE PONTOS

Faixa de número de ponto	$ind_{nropontos}$
$N = 0$	0
$1 < N < 3$	0.70
$4 < N < 15$	0.80
$16 < N < 50$	0.90
$N > 50$	1

O segundo indicador, $ind_{distpontos}$, atribui uma confiança maior quando os pontos estão melhor distribuídos ao longo do objeto. Para isso, o sistema calcula as maiores dimensões de dois retângulos: um que contém o objeto e outro que contém todos os pontos utilizados no cálculo da altitude e divide essa por aquela.

(c) se um número grande de pontos (mais do que 20 pontos) resultarem válidos serão desprezados os 10% maiores e 10% menores valores de altitude e será tomada a média dos 80% restantes. A confiança também será atribuída conforme acima explicitado.

Esses valores serão importantes para o processo de classificação dos objetos conforme descrito mais a frente. A Figura 82 mostra os histogramas das altitudes dos pontos calculadas para os três objetos do exemplo da Figura 78. A tabela 21 é o resultado final dessa fase da metodologia.

FIGURA 82. HISTOGRAMA DAS ALTITUDES CALCULADAS PELA CORRELAÇÃO SOBRE OS OBJETOS DA FIGURA 81.

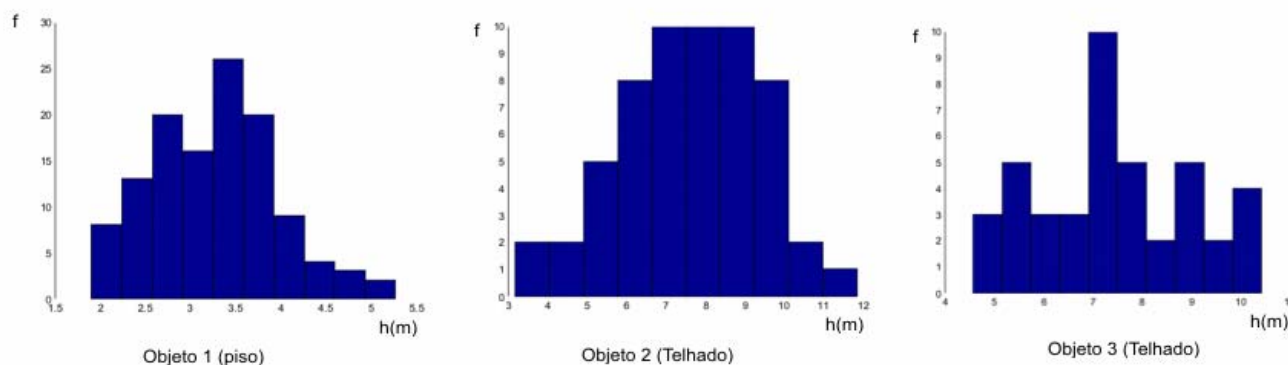


TABELA 21. RESULTADO DA DETERMINAÇÃO DA ALTITUDE POR CORRELAÇÃO E USO DA INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

Objeto	Nro Pontos	Ind _{nroptos}	Ind _{distptos}	Confiança	Média (m)	Desvio padrão (m)
1	121	1	0,99	0,99	3,0	0,7
2	58	1	0,98	0,98	7,6	1,9
3	42	0,9	0,96	0,86	6,8	1,4

Além disso, os valores encontrados para essas altitudes, no exemplo em exposição, podem ser considerados muito bons. Observe-se que por intersecção fotogramétrica a pretensão de precisão da medida de altitude é dada por uma expressão que envolve basicamente (Tommaselli, 2003; Albertz e Kreiling, 1989):

$$dz = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} d_{px} \quad (51)$$

Nessa equação, dz é a precisão esperada, H a altura de vôo, B a base fotogramétrica (ou a distância que separa duas tomadas consecutivas), f a distância focal e d_{px} é a precisão com que pode ser medida a paralaxe, nesse caso a precisão com que as coordenadas dos pontos homólogos foram obtidas. Adotando os parâmetros do vôo Matinhos ($H = 680$ m, $B = 220$ m, $f = 8,5$ mm e para $d_{px} = 2$ píxeis) e dz será aproximadamente igual a 1 m. Devido a essa degradação da precisão e a imprecisões associadas ao processo de correlação, os valores das altitudes para o objeto 1, totalmente no nível do terreno, variaram de 2 a 5 m. Face ao grande número de observações, a média acabou resultando apenas 60 cm diferente do valor do MNMT médio no terreno: 3,6 m.

A interpretação dos dados da tabela remeteriam a que o objeto 1 está ao nível do terreno enquanto 2 e 3 provavelmente estão significativamente acima, sendo pois selecionados como telhado.

No caso dos valores de altitude não serem solucionados ou a confiança dos valores obtidos resultarem muito baixas (menor do que 0,5) então a conclusão acerca da atualidade da cartografia para o lote estará prejudicada e o lote será anotado como indeterminado, sendo remetido oportunamente para a interação com o usuário.

4.5. Análise e decisão

Do resultado da classificação segue a determinação da similaridade com as formas dos objetos modelados geometricamente através dos dados da cartografia. E como foi extensamente ilustrado no tópico 3.2.11, para tal, será utilizado o conceito da distância Hausdorff.

Mas antes três detalhes importantes. Primeiro, se houver sombras na imagem sintética os objetos da imágete selecionados como sombras também serão testados quanto a sua similaridade e esse valor utilizado para reforçar ou punir a métrica do próprio objeto. Segundo, como na cartografia disponível há indicação da presença de árvores isoladas e pequenos

agrupamentos de árvores essa informação é utilizada para aumentar a tolerância sobre as medidas de similaridade. Terceiro, os objetos da imagem encaminhados para o teste sofrerão a suavização de seus contornos utilizando ferramentas da morfologia matemática (item 3.2.4). Nas figuras 83, 84 e 85 ilustrações desses detalhes.

FIGURA 83. EVIDÊNCIA DA SIMILARIDADE DAS SOMBRAS, REFORÇANDO A DECISÃO SOBRE A ATUALIDADE DA CARTOGRAFIA



Imagete de DSC06040

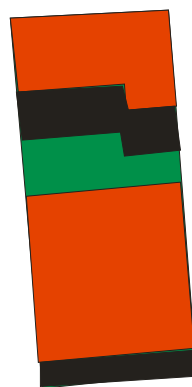


Imagem sintética do lote

FIGURA 84. TRECHO DA BASE CARTOGRÁFICA DE MATINHOS COM POSIÇÕES DE ÁRVORES ISOLADAS E DE GRUPOS DE ÁRVORES.

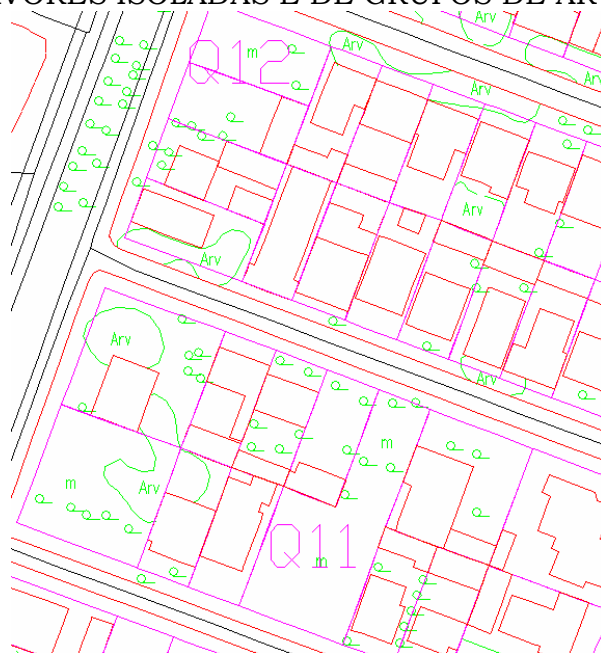
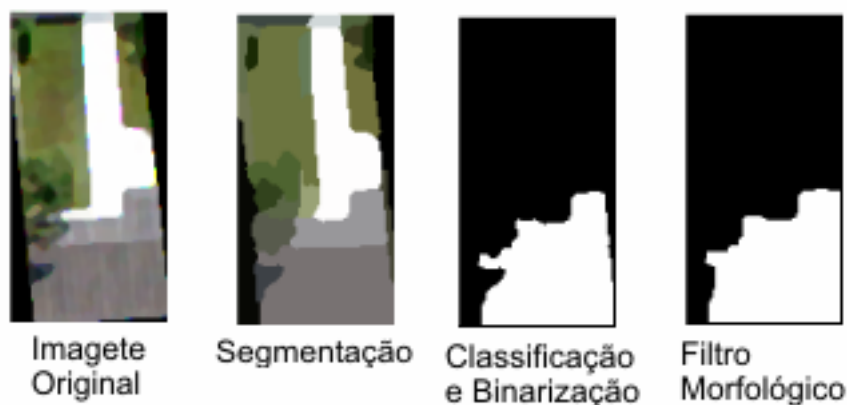


FIGURA 85. SEQUÊNCIA DE PROCEDIMENTO APLICADO A IMAGETE ATÉ A SUAUIZAAÇÃO DO CONTOENO PELO OPERADOR MORFOLÓGICO DE FECHAMENTO.



Uma série de testes com as alternativas de aplicar a distância de Hausdorff original, ou a distância por proximidade (ou vizinhança, VHD), ou a distância por continuidade (CHD) foram executados sobre um conjunto de lotes amostrados onde havia a presença de árvores e sombras.

O desempenho de VHD mostrou-se mais adequado, garantindo medidas mais próximas das intuitivas, resultantes da fotointerpretação. Assim os objetos que devem ser submetidos ao teste de similaridade serão alvo do algoritmo de VHD, conforme 3.2.11.

O limite imposto para cômputo de VHD é um parâmetro fundamental para os resultados. Valores de tolerância maiores levam evidentemente a um relaxamento do critério de aceitação. Valores muito reduzidos, por sua vez, tendem a rejeitar lotes por detalhes mínimos e torna o processo muito pouco efetivo.

Então, há sobre esse limite a necessidade de permitir, a priori, a valoração desse critério subjetivo, ou seja, do quanto rígido se deseja o comportamento do sistema. Além disso, como foi dito logo acima, há necessidade de flexibilizar esse valor em função da presença de sombras e das árvores.

A proposta aqui é partir de um valor base, função do quanto seletivo se deseja que o algoritmo seja, e ir aumentando esse valor segundo os critérios dinâmicos, que são função das características de cada lote em relação à presença de árvores e/ou sombras na vizinhança de objetos relevantes.

As alternativas para as imagens desse estudo, cuja resolução oscila em torno de 25 a 30 cm, seriam aquelas apresentadas na tabela 22.

TABELA 22. VALORES DE TOLERÂNCIA PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE HAUSDORFF POR VIZINHANÇA E DO LIMITE PARA ACEITAÇÃO DA HIPÓTESE DE ATUALIDADE DO LOTE

	Muito Rígido	Rígido	Médio	Flexível	Muito Flexível
Valor Inicial	2	3	4	5	6
Presença de árvores ou sombra	+2	+2	+3	+3	+4
Valor máximo	4	5	7	8	10
VHD _{min} para lote atualizado	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75

Ou seja, para uma condição muito rígida, num lote onde não se evidencie presença de árvores ou de sombras, 95% dos pontos do contorno dos objetos presentes na base e na imagem devem estar afastados no máximo de 50 cm. Na condição mais flexível, na presença desses elementos atenuantes da similaridade, seria aceito que 25% dos pontos estivessem afastados de mais de 2,5 m.

Como citado, quando houver sombra projetada no terreno e prevista na imagem sintética a área de sombra também será comparada com a dos objetos da imagem. Nesse caso o índice de similaridade final será uma composição ponderada do índice da construção e da sombra por:

$$VHD_{comp} = \frac{K_1 \cdot VHD_{constr} + K_2 \cdot VHD_{sombra}}{K_1 + K_2} \quad (52)$$

K1 e K2 foram tomados aqui como 0,8 e 0,2, ou seja, a preponderância do índice final será dada à similaridade das edificações, porém com 20% de influência da sombra projetada.

Embora o procedimento acima possa ser aplicado às duas imagens selecionadas para o mesmo lote, essa seria uma providência que pouco acresceria à decisão. Assim, opta-se por aplicar as medidas de similaridade somente na imagem recortada de posição mais próxima ao centro da imagem.

5. RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASOS

Ao longo dos capítulos anteriores muitos dos resultados obtidos pela pesquisa empreendida foram apresentados. Optou-se por esse formato de texto como forma de tornar bastante clara a linha de raciocínio utilizada, enquanto tão vastas as temáticas abordadas.

Assim, no capítulo 2, quando se deu vazão a importante questão da precariedade da cartografia cadastral nacional, foram de imediato apresentados resultados da breve investigação executada e uma análise desses resultados foi desenvolvida. Da mesma forma em relação a subutilização da tecnologia aerofotogramétrica e a proposta de uso de sistemas de baixo custo, tendo sido especificado um protótipo de sistema de alta performance baseado na tecnologia das câmaras digitais.

No capítulo 4, na medida que a metodologia ia sendo descrita, uma série de resultados de testes com algoritmos de síntese, processamento e análise das imagens digitais foram sendo mostrados e sistematicamente, passo a passo, foram sendo dadas amostras da evolução do processo até a tomada de decisão acerca da compatibilidade entre os registros cartográficos vetorizados e a imagem.

Assim, nesse ponto, cabe objetivamente aplicar a metodologia em uma área teste, ou melhor, devido a disponibilidade de dados, em duas áreas, conforme descrito anteriormente: Pelotas e Matinhos.

É interessante perceber que determinadas propriedades são comuns entre as áreas escolhidas e outras que as diferem significativamente em relação ao objeto do estudo. Em nenhuma das áreas há grandes variações de altitude o que facilita sobremaneira o processamento fotogramétrico. Além disso, não são áreas onde ocorrem muitos edifícios altos. Há uma justificativa simples para isso: edifícios altos projetam-se perspectivamente de maneira evidente sobre os terrenos vizinhos, geram áreas de oclusão e sombras muito grandes e exigem um tratamento excepcional. Porém, um aspecto da prática cadastral também pode aqui ser explorado e justifica que

esses prédios não sejam os alvos prediletos da metodologia apresentada: todos os edifícios são invariavelmente autorizados e regularizados, portanto sua representação na base cartográfica estará segura, correta e atualizada.

A área de Matinhos, típica de balneário, possui terrenos regulares e de no mínimo 200 m², em geral bem maiores do que a das edificações existentes em seu domínio. Há ajardinamento, grandes áreas livres, pavimentadas ou não, e boa separação entre os prédios vizinhos. Em Pelotas a área é mais típica de bairros residenciais de uma cidade que é centro comercial e industrial regional e que contém algumas edificações da população de menor renda. Ou seja, a densidade de construções é bem maior e menos regulares, sendo comuns adjacências entre as construções.

Do ponto de vista metodológico, serão apresentados estudos de casos onde o sistema reconheceu com sucesso terrenos que estavam atualizados. Depois casos de sucesso de lotes que foram efetivamente reconhecidos como tendo sofrido alterações. Em seguida serão apresentados casos de falhas do algoritmo, as menos críticas, de áreas que foram selecionadas para revisão por fotointérprete por supostas mudanças detectadas, porém onde os objetos estavam em dia; e também as mais críticas, de lotes marcados como compatíveis e que possuíam significativas mudanças.

Finalmente, uma visão geral das áreas testes será mostrada e uma descrição estatística dos resultados será apresentada.

Mas antes, no tópico seguinte, será preliminarmente registrada a alta qualidade geométrica das imagens adquiridas pelos dois sistemas fotogramétricos digitais utilizados e processadas segundo as técnicas aerofotogramétricas já descritas.

5.1. Resultado do processamento por aerotriangulação

A estratégia de processamento das aerofotos digitais passa por dividir grandes conjuntos de imagens em sub-blocos com não mais do que 60 a 80 unidades. O controle dos blocos foi executado segundo duas técnicas

independentes: integralmente por pontos coletados por GPS (posicionamento estático rápido com 15 minutos de ocupação, pós-processados pela portadora) e por pontos amostrados sobre a base cartográfica pré-existente.

A aerotriangulação do bloco de Matinhos será aqui explorada em maiores detalhes, como exemplo. Ela foi executada com o esforço total de aproximadamente 20 horas, considerados os tempos de planejamento e observação manual dos pontos de ligação, controle e verificação e o tempo consumido com o processamento da aerotriangulação. Ainda foram consumidas algumas horas na ortorretificação e mosaico das imagens. A figura 86 mostra a superposição entre um conjunto de duas fotos ortorretificadas com os parâmetros da aerotriangulação e a base cartográfica. Já aí fica explícita a compatibilidade planimétrica entre os dados.

Na seqüência, a figura 87 é parcela do mosaico constituído com as aerofotos ortorretificadas. A figura 88 é uma ampliação da área destacada na figura 87 e salienta a alta qualidade do casamento de feições. O polígono que transpõe a imagem nessa última figura traduz justamente a área de ligação entre duas fotos consecutivas.

Com a finalidade de avaliar a qualidade dos ajustamentos quatro resultados são registrados: os resíduos dos pontos de controle lidos nas imagens, os resíduos dos pontos de controle ajustados, os resíduos das coordenadas dos pontos de verificação e a comparação de um conjunto de medidas de campo. As tabelas 23, 24, 25 e 26, respectivamente, registram os valores encontrados. Observe-se que essas imagens ortorretificadas, se vetorizadas, muito provavelmente seriam capazes de gerar uma carta planimétrica compatível com PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico) classe A para escala 1:2000, uma vez que 90% dos pontos medidos possuem erro inferior a 60 cm.

FIGURA 86. BASE CARTOGRÁFICA DE MATINHOS, SOBREPOSTA ÀS TRÊS PRIMEIRA FOTOS DO BLOCO ORTORRETIFICADAS



FIGURA 87. PARTE DO MOSAICO DAS IMAGENS ORTORRETIFICADAS
(A IMAGEM APRESENTA TRECHOS DE 4 FOTOS)



FIGURA 88. DETALHE NA ÁREA LIMITE ENTRE DUAS IMAGENS

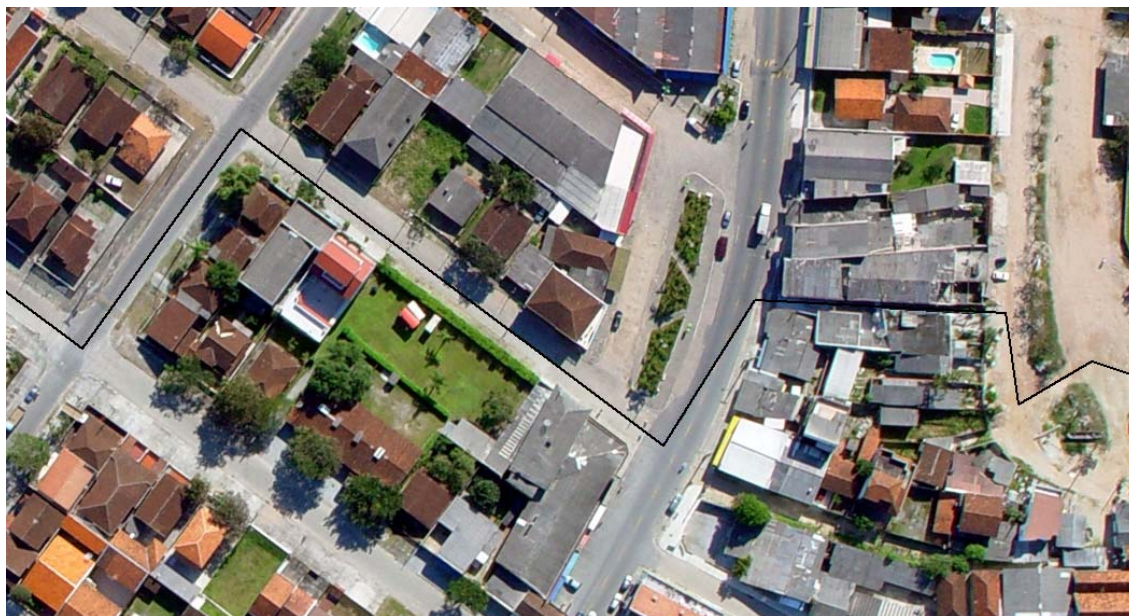


TABELA 23. RESÍDUO NO ESPAÇO IMAGEM DOS PONTOS DE CONTROLE DO BLOCO DE MATINHOS

PTO	FOTO	Resíduos (x) (píxeis)	Resíduos (y) (píxeis)
139	1	-0,765	-0,056
139	2	1,538	0,095
140	1	1,159	-1,871
140	2	1,448	1,547
141	2	0,121	-0,870
141	3	0,969	-0,433
142	3	1,137	-1,559
142	4	1,175	0,250
143	5	1,518	0,038
143	6	2,037	-1,180
144	5	0,797	-0,731
144	6	-0,164	-1,127
144	7	0,355	0,571
145	5	1,773	-1,349
145	6	2,036	-1,129
145	7	1,222	-1,727
146	7	0,263	-0,036
146	8	-0,786	-1,419
146	9	0,786	-1,365
147	9	0,175	1,655
147	10	0,838	0,011
147	11	1,924	-0,125
148	10	1,205	-0,330
148	11	-0,387	-1,309

TABELA 24. RESÍDUOS NAS COORDENADAS DOS 8 PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO BLOCO DE MATINHOS

PONTO DE VERIFICAÇÃO	COORD N (m)	COORD E (m)	COORD H (m)
139	0,41	-0,15	0,37
140	0,36	-0,43	-0,08
141	-0,12	0,26	-0,45
142	0,35	0,27	-0,89
143	0,76	0,81	0,54
144	-0,18	-0,45	1,08
145	-0,24	0,23	-0,89
146	0,45	-0,17	1,12
147	0,02	-0,01	0,30
148	0,28	0,17	0,51

TABELA 25. RESÍDUOS NAS COORDENADAS DOS 8 PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO BLOCO DE MATINHOS

PONTO DE VERIFICAÇÃO	COORD N (m)	COORD E (m)	COORD H (m)
150	0,67	0,48	0,82
151	-0,78	-1,01	0,87
152	-0,32	0,80	-1,25
153	-0,12	0,48	-1,45
154	-0,45	-0,54	1,10
155	0,81	-0,18	-0,45
156	0,62	-0,31	1,62
157	0,58	0,65	0,82

TABELA 26. ALGUMAS DIFERENÇAS DE MEDIDAS ENTRE A BASE CARTOGRÁFICA E FEIÇÕES NAS IMAGENS ORTORRETIFICADAS

DESCRIÇÃO DA MEDIDA	BASE CARTOG (m)	IMAGEM ORTORRET (m)	DIFERENÇA (m)
Face do quarteirão da Rua Munhoz da Rocha entre Rua de Fê e Rua Bom Jesus do Iguapé	58,5	57,9	0,6
Face do quarteirão da Rua Jucelino Kubitscheki entre Albano Muller e Bevenuto Gussi	64,3	64,0	0,3

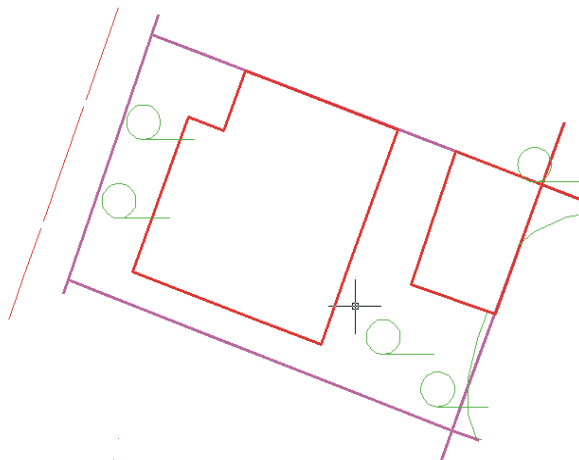
DESCRIÇÃO DA MEDIDA	BASE CARTOG (m)	IMAGEM ORTORRET (m)	DIFERENÇA (m)
Face do quarteirão da Rua Campo Mourão entre a Av. Beira Mar e a Av. Paranaguá	140,8	138,9	1,1
Testada dos lotes da esquina da Rua Satiro P. de Oliveira e N. Sr. Do Bonfim	23,5	23,3	0,2
	13,1	13,0	0,1
	12,0	11,5	0,5
	10,7	10,2	0,5
Profundidade dos lotes da esquina da Rua Satiro P. de Oliveira e N. Sr. Do Bonfim	24,0	24,8	-0,8
	24,1	24,2	-0,1
	23,8	23,1	0,7
	13,5	13,9	-0,4
Testada dos lotes da Rua Mozar G. Correa entre a Av. Prefeito Roque Vernalha e a Rua das Sereias	20,8	20,0	0,8
	13,8	13,1	0,7
	14,3	14,3	0,0
	14,5	14,5	0,0
	14,0	14,7	-0,7
	14,0	14,5	-0,5
	13,9	14,5	0,6
	15,7	15,5	0,2
	40,0	40,5	-0,5

5.2. Cenário da área urbana de Matinhos – PR

Primeiramente, uma rememoração das etapas da metodologia aplicadas com o objetivo de analisar as imagens aéreas e para medida de sua compatibilidade com a cartografia existente será apresentada.

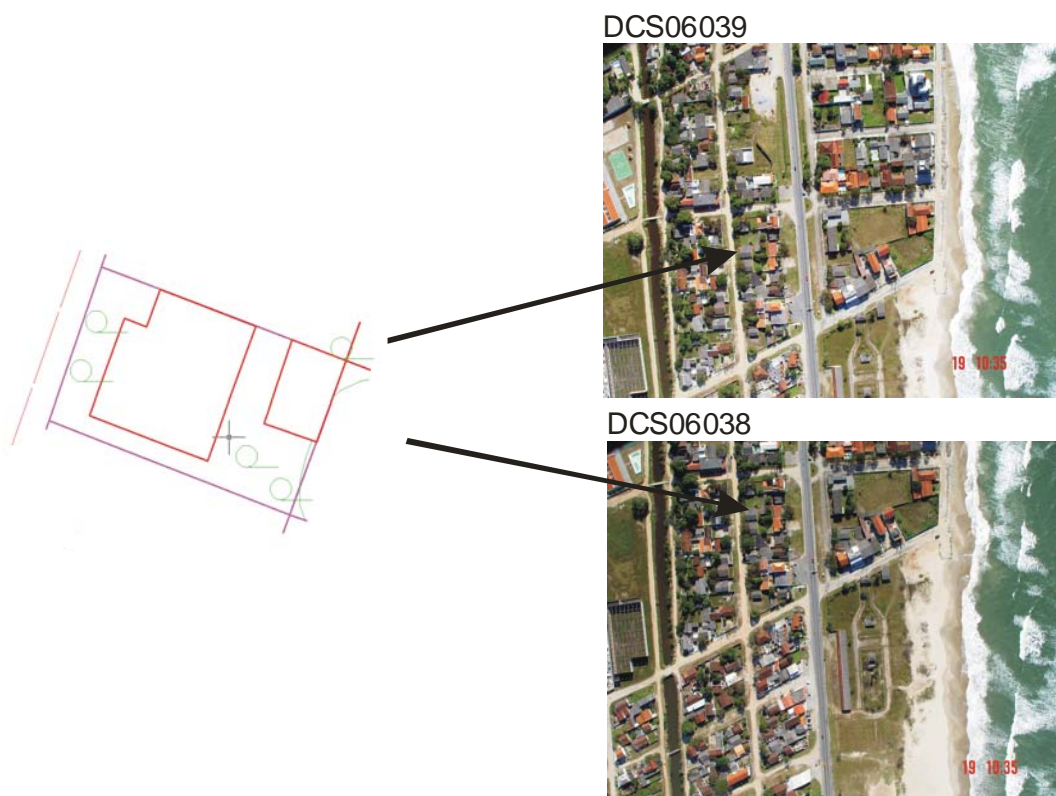
Etapa 1: da base cartográfica e do cadastro existente são geradas estruturas de dados com registros de lotes e construções, como mostrado nas tabelas 17 e 18. Na figura 89 está um lote do quarteirão número 6, que será utilizado para ilustração de todo o processo.

FIGURA 89 – TÍPICA REPRESENTAÇÃO DE UM LOTE NA BASE CARTOGRÁFICA



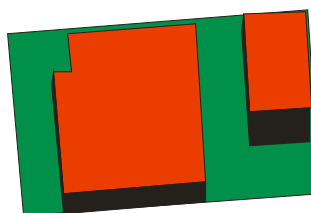
Etapa 2: para cada lote são determinadas as duas fotos mais próximas que o contenha integralmente, sendo que os parâmetros de orientação das fotos estão conhecidos. A figura 90 ilustra o processo.

FIGURA 90. DUAS IMAGENS CONSECUTIVAS ONDE APARECEM O LOTE DA FIGURA 89 SÃO IDENTIFICADAS



Etapa 3: os dados das estruturas de lotes e suas edificações são transferidos ao algoritmo de geração da imagem sintética tendo como parâmetros adicionais a orientação das fotos, as coordenadas geográficas do centro da região de estudo e hora/minuto da tomada fotográfica para geração do modelo de sombras. O resultado para o lote em análise está na figura 91.

FIGURA 91. IMAGEM SINTÉTICA DO LOTE



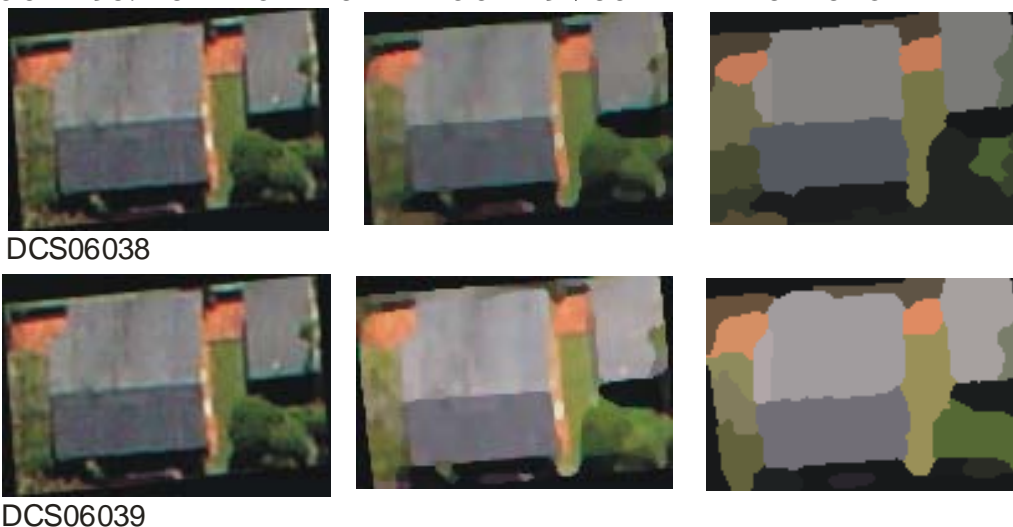
Etapa 4: as imagens aerofotográficas são recortadas por envelope nos limites dos lotes e são geradas as imágetes. Na figura 92 as imágetes recortadas de DSC06038 e de DSC06039, respectivamente numeradas como 1 e 2 respectivamente.

FIGURA 92. IMÁGETES DO LOTE.



Etapa 5: as imágetes geradas serão alvo de suavização com preservação de bordas, a fim de permitir a maior homogeneização das áreas, e em seguida segmentadas pelo programa baseado no algoritmo Mean Shift. Pequenas regiões que resultem serão agregadas as maiores vizinhas compatíveis. No exemplo das imágetes do lote modelo, retratado na figura 93, resultaram 20 segmentos principais para o caso da imágete 1 e 3 segmentos para a de número 2.

FIGURA 93. AS IMAGETES DA FIGURA 92 SUAVIZADAS E SEGMENTADAS



Etapa 6: a imagem 2, escolhida por ser resultante da foto cujo centro projetivo está mais próximo ao centro do lote, será pré-classificada com base nas cores dos segmentos. Serão nesse passo identificadas áreas de vegetação, sombra e também casos de água de piscinas;

Na figura 94 estão em verde todos os segmentos correspondentes a vegetação e em preto àqueles automaticamente identificados como sombras. Nos demais segmentos as cores originais são preservadas e esses são candidatos a serem classificados como telhado ou pavimento em função do filtro altimétrico.

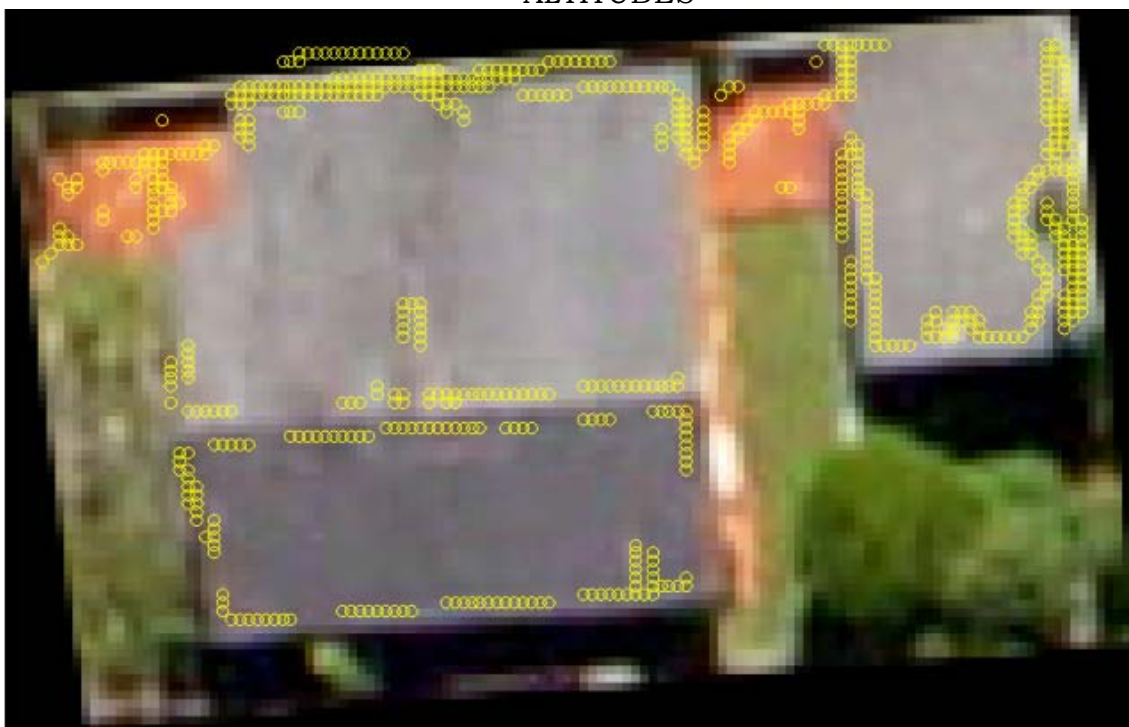
FIGURA 94. ÁREAS CORRESPONDENTES A VEGETAÇÃO E SOMBRAS NA IMAGEM 2



Etapa 7: o algoritmo de máxima correlação cruzada é aplicado para agregar valores de altitudes aos segmentos. Primeiramente os segmentos da imagem 1 compatíveis com aqueles não selecionados na pré-classificação da

imagem 2 são identificados. O sistema vai fazer a busca por pontos onde há informação disponível adequada ao modelo MCC, sobre as imagens originais, nas áreas desses segmentos. Em seguida são efetuadas as buscas por pontos homólogos e aplicado o modelo de intersecção de feixes para cálculo de altitudes em todos aqueles em que resultaram altos coeficientes de correlação. Calculadas as altitudes resta rotular a cada segmento um valor de altitude e um indicador de confiança nesse valor estimado, conforme descrito na metodologia. Para o lote teste os pontos selecionados seriam aqueles mostrados na figura 95.

FIGURA 95. PONTOS AUTOMÁTICAMENTE SELECIONADOS PARA CÁLCULO DAS ALTITUDES



Etapa 8: Se o valor da confiança resultar maior que 0,7, a média das altitudes dos pontos homólogos registrados terá sido atribuída ao segmento e essa informação será base da classificação como telhado ou pavimento, em função da altitude média do terreno. No caso da figura 95 todos os

segmentos tiveram atribuídos com sucesso valores de altitude e puderam ser classificados como telhados ou não resultando a uma imagem do lote conforme a figura 96. Nessa imagem estão presentes três classes: telhado (vermelho), sombra (preto) e todo os demais segmentos (verde);

FIGURA 96. RESULTADO FINAL DA CLASSIFICAÇÃO DO LOTE MODELO



Etapa 9: os objetos correspondentes às classes telhado e sombras têm suas bordas simplificadas pelo algoritmo de fechamento morfológico binário, conforme ilustra a figura 97.

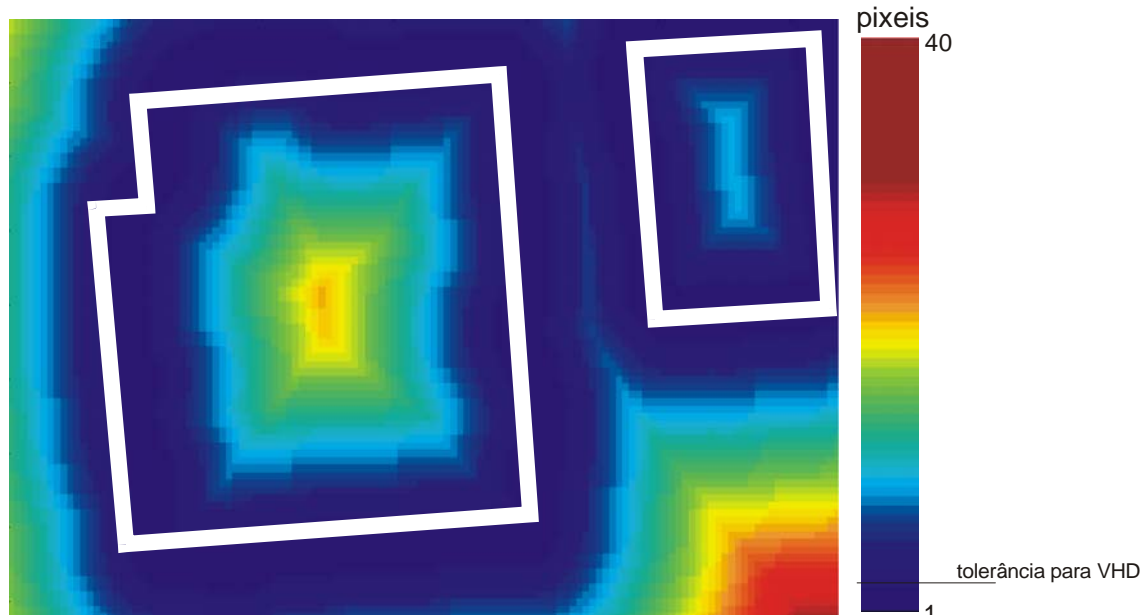
FIGURA 97. OBJETOS CLASSIFICADOS COMO CONSTRUÇÕES SIMPLIFICADOS PELO OPERADOR MORFOLÓGICO



Etapa 10: o algoritmo da distância Hausdorff, em sua versão modificada para medida de continuidade (vizinhança – VHD) é aplicado para obtenção de um valor de compatibilidade entre as formas de construções e sombras. Primeiramente, conforme ilustra a figura 98, a transformada de distância é aplicada sobre os objetos e sobre ela a medida de similaridade, conforme algoritmo citado. Os polígonos em branco na referida figura

representam os objetos da cartografia projetados conforme imagem sintética da figura 91.

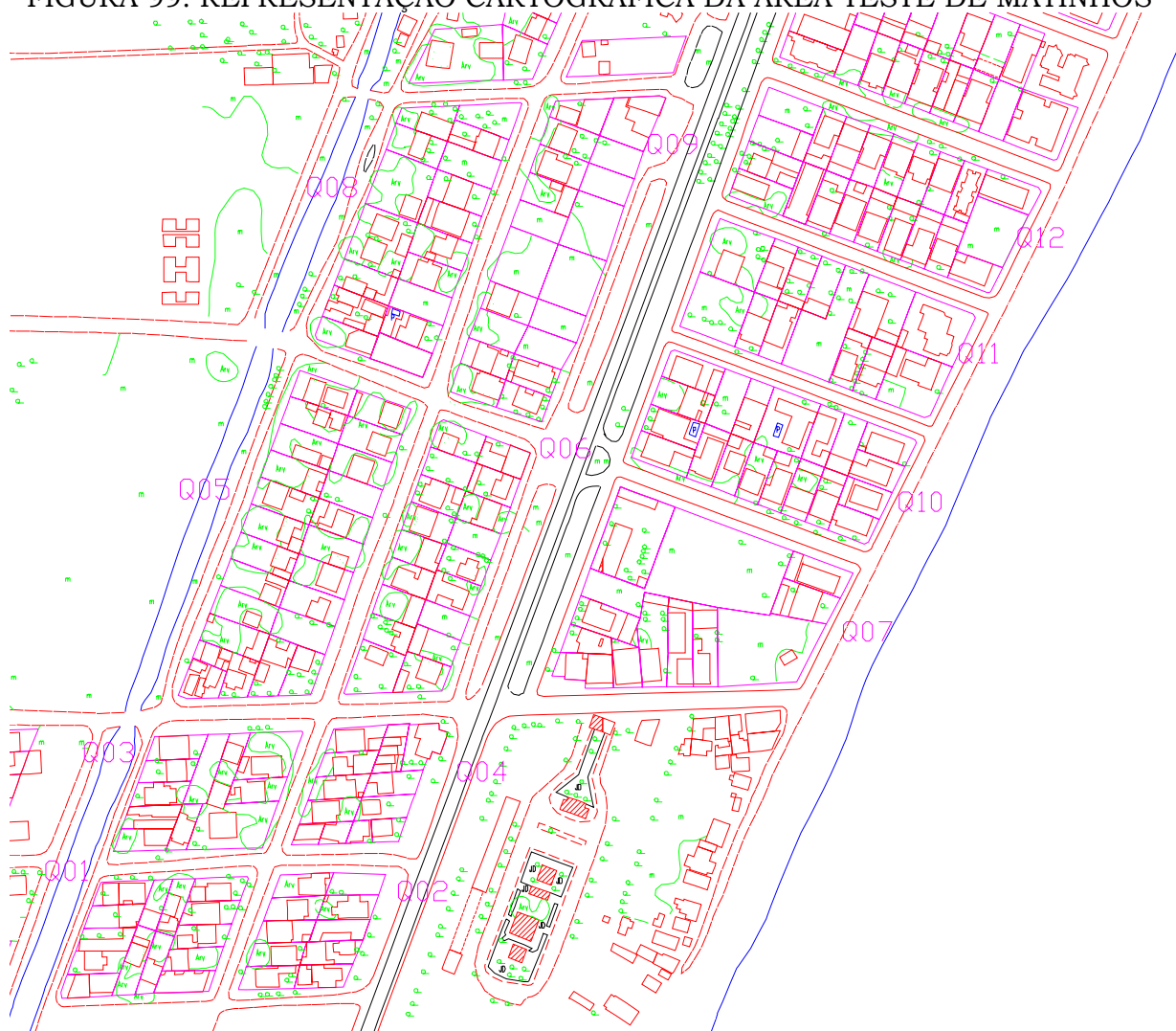
FIGURA 98. TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA APLICADA SOBRE A IMAGEM BINÁRIA RESULTANTE DO FILTRO MORFOLÓGICO DE BORDAS



Etapa 11: uma tabela de decisão é aplicada por fim, resultando o lote classificado como atualizado (OK) ou não atualizado. No caso do exemplo, VHD da construção resulta igual a 1,0 e da sombra igual a 0,62. A composição ponderada das medidas resulta $VHD_{FINAL} = 0,92$. Adotados os parâmetros de decisão segundo designação média (tabela 22) resulta o lote marcado como *em dia*.

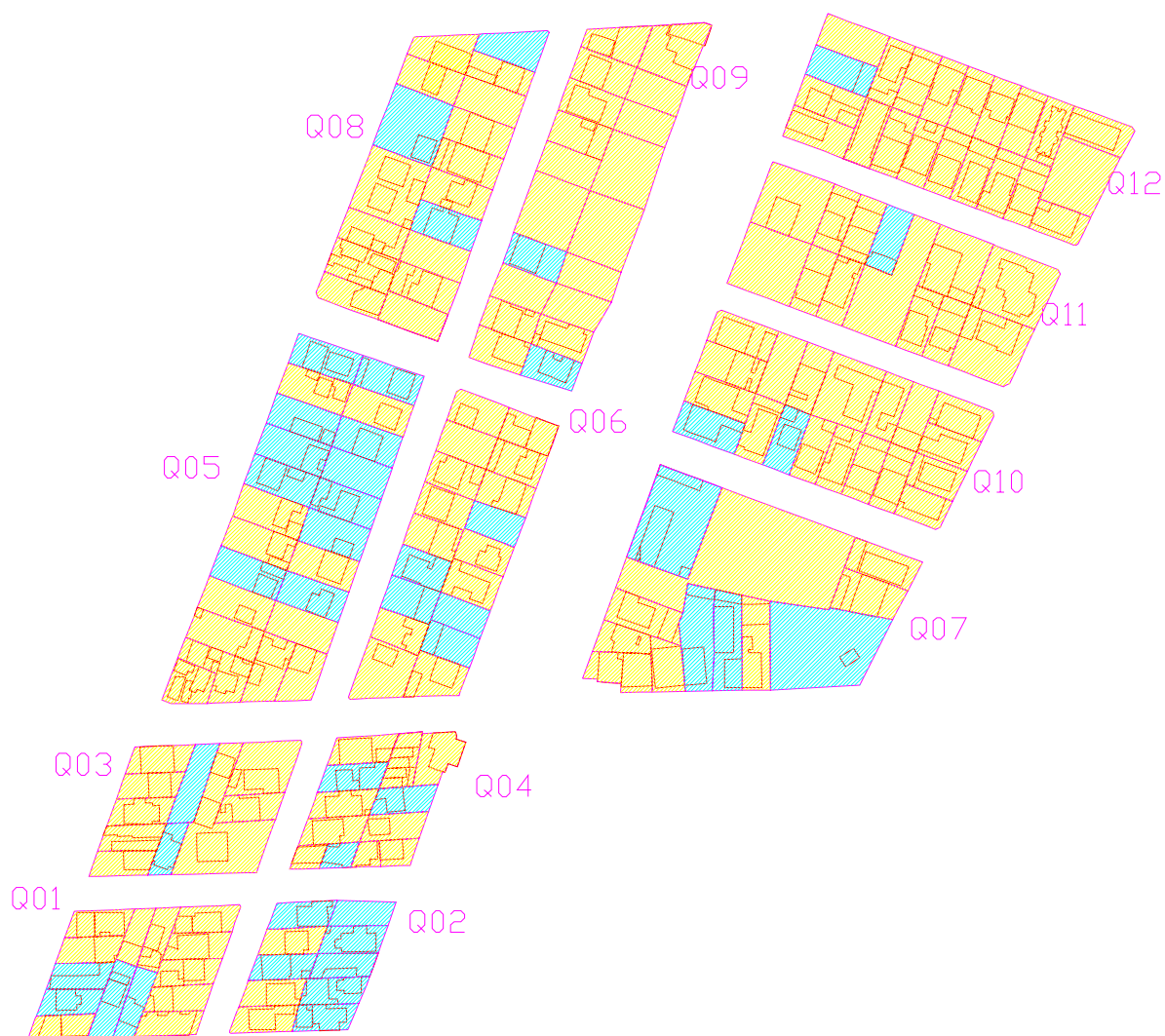
Um conjunto de 187 lotes sobre 12 quarteirões foi escolhido para testar essa metodologia e está apresentado na figura 99, em pequena escala. Esses lotes ocupam uma área de aproximadamente 500 x 500 m à beira mar e nela é encontrada predominantemente prédio residenciais unifamiliares.

FIGURA 99. REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DA ÁREA TESTE DE MATINHOS



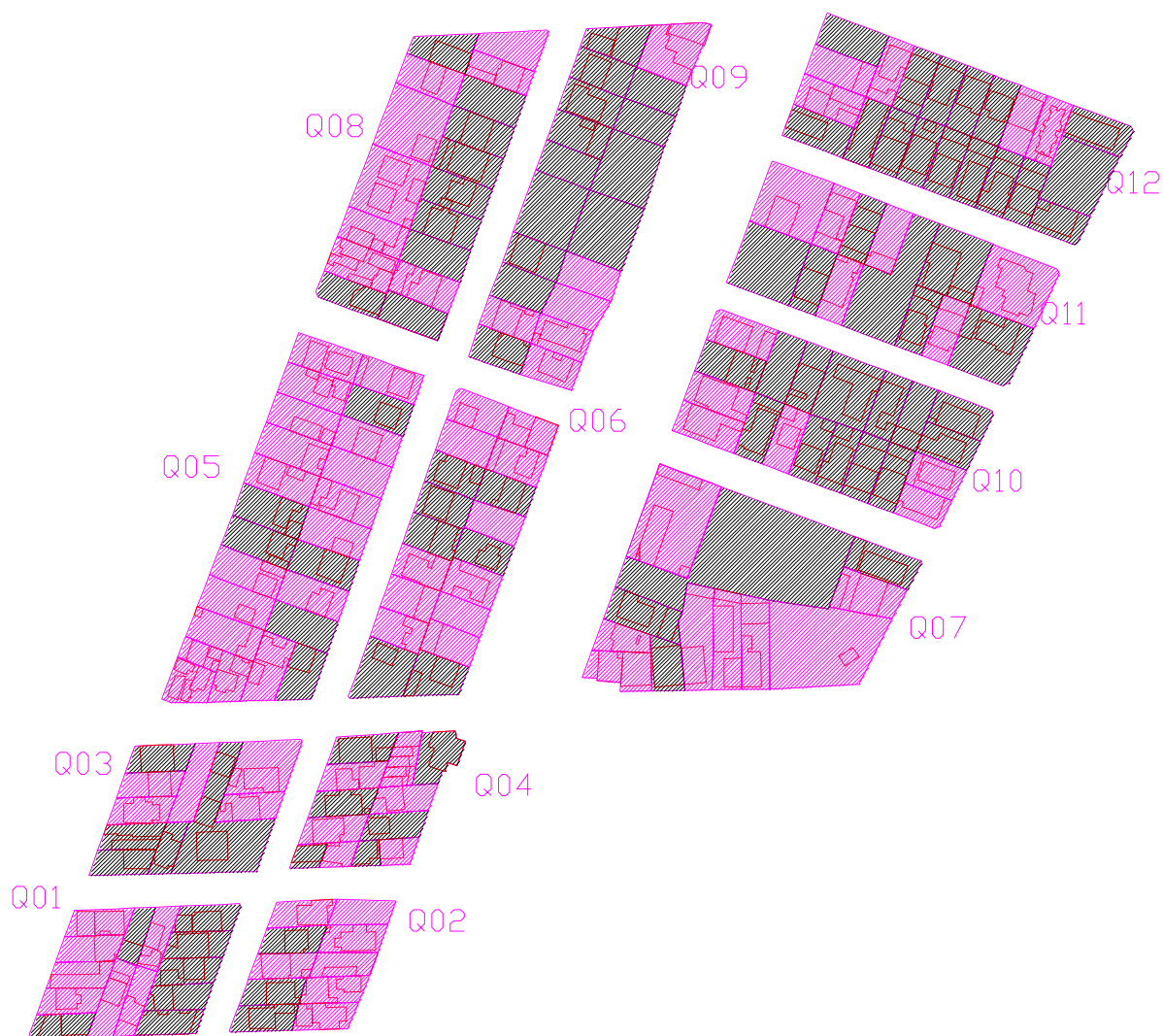
O mosaico de imagens ortorretificadas foi comparado com essa base por fotointerpretação manual, lote a lote. Resultaram dessa análise visual 142 lotes plenamente de acordo com a base vetorial e os restantes 45 com algum tipo de alteração daquela realidade. A distribuição desses dados pode ser visualizada na figura 100, onde em amarelo estão os lotes considerados *em dia* e na cor ciano aqueles onde será necessário aplicar um processo de atualização cartográfica.

FIGURA 100. RESULTADO DA FOTOINTERPRETAÇÃO MANUAL DOS LOTES



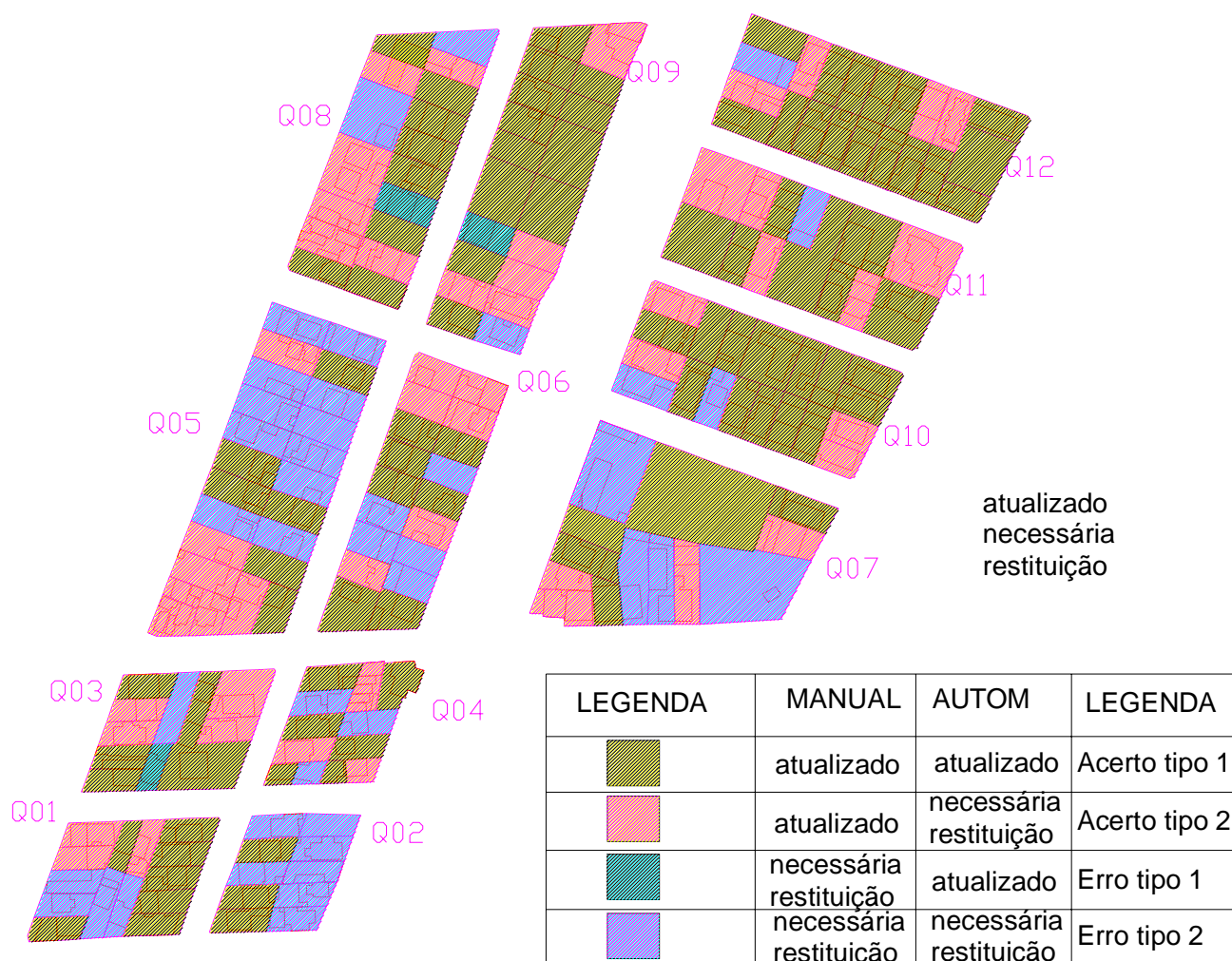
Quando os mesmos 187 lotes são submetidos à análise computacional, segundo processo explicado, o sistema indica que 96 lotes estão atualizados, mas as medidas de similaridade em 91 deles estiveram abaixo dos limites estipulados. A figura 101 é uma equivalente a apresentada anteriormente para o caso da classificação automática dos lotes. Em preto os lotes ditos *em dia* e em magenta os marcados como *a serem atualizados*.

FIGURA 101. RESULTADO DA ANÁLISE AUTOMÁTICA DOS LOTES



Quando confrontados os resultados obtidos pelo foto-intérprete e pelo processo automático, mostrado nas figuras 100 e 101, pode-se observar o quanto o sistema foi efetivo na determinação da necessidade de atualização da representação cartográfica de cada lote. A figura 102 mostra essa comparação.

FIGURA 102. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NA FIGURA 100 E 101.



A tabela 27 apresenta numericamente esses resultados. Nela, designados como *acerto do tipo 1* estão os casos onde o fotointérprete e a análise automática concordam que os lotes estão *em dia*. *Acerto do tipo 2*, também indica concordância entre as interpretações, porém quando ambas apontam não compatibilidade entre base vetorial e imagem. *Erro do tipo 1* é o erro crítico para atualização, pois o sistema automático aponta o lote como

em dia mas a observação atenta indica que há mudanças nesse espaço. *Erro do tipo 2* refere-se ao caso inverso.

Observe-se que apenas em 3 casos ocorre o erro crítico, ou seja, são lotes que deveriam estar sendo enviados ao processo de atualização (como uma restituição fotogramétrica, por exemplo), porém o sistema automático os identificou como compatíveis com a representação cartográfica. Isso indica uma taxa de erro crítico de 1,6%.

Porém, em 50 outros lotes o sistema não apresenta o mesmo resultado que a identificação visual. São casos onde a intervenção do operador será exigida mas não haverá o que atualizar, ou seja, não será um erro crítico para o objetivo final, mas será tempo dispensado em áreas onde se evidencia similaridade entre as representações vetoriais e matriciais dos lotes. Eles ocorrem principalmente devido a presença de sombras ou oclusão das áreas de telhados por vegetação ou prédios vizinhos, conforme será mostrado mais adiante.

O mais importante para o objeto do estudo é expressar que em 71% dos casos o método foi capaz de produzir a mesma interpretação do fotointerprete.

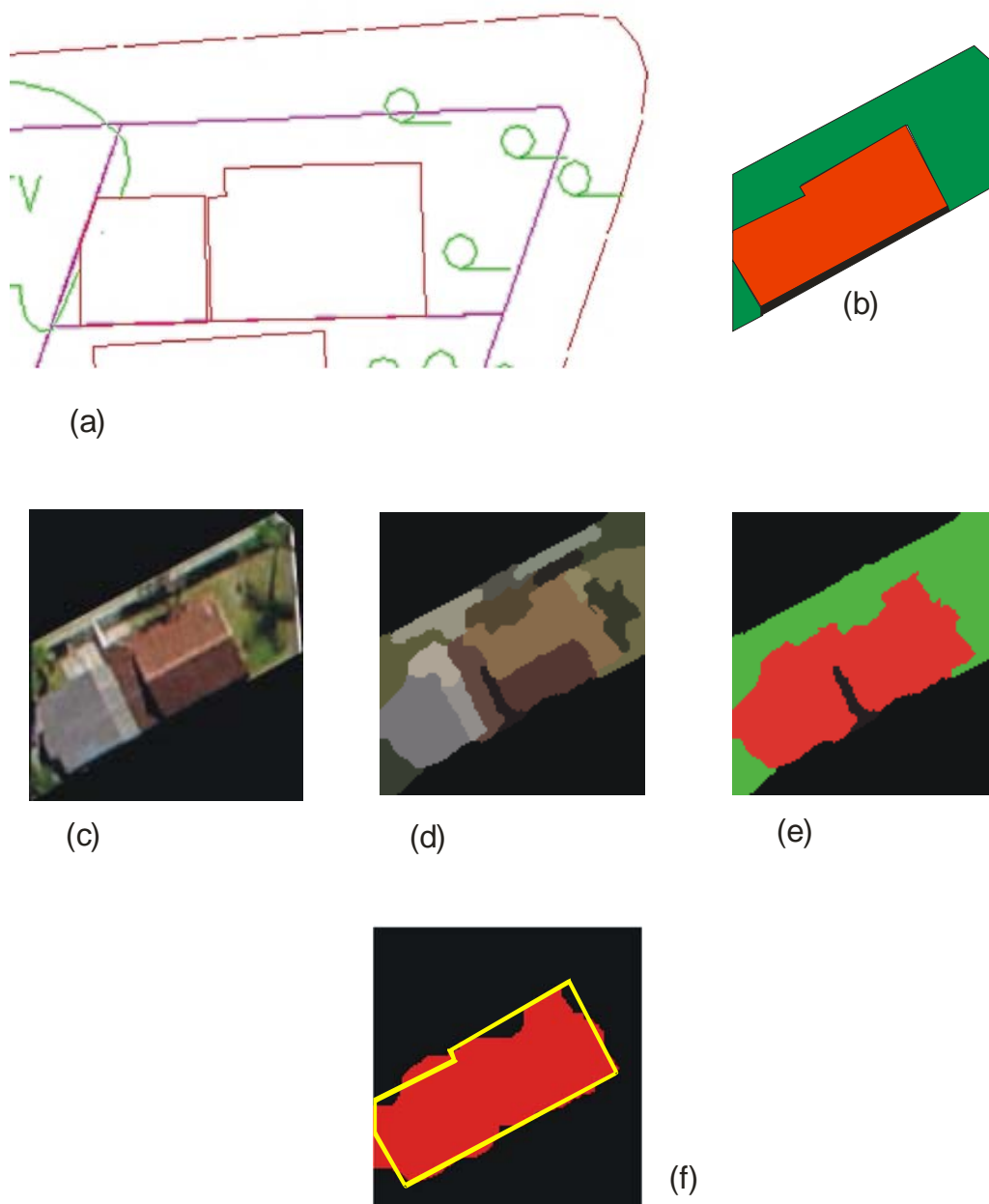
TABELA 27. RESULTADO DA ANÁLISE DE IMAGENS CONFRONTADO COM A FOTOINTERPRETAÇÃO VISUAL

QUART.	NRO LOTES	FOTOINTERPRETE		ANÁLISE DA IMAGEM		ACERTO TIPO 1	ACERTO TIPO 2	ERRO TIPO 1	ERRO TIPO 2
		OK	A RESTIT.	OK	A RESTIT.				
1	14	10	4	7	7	7	4	0	3
2	10	3	7	3	7	3	7	0	0
3	10	8	2	5	5	4	1	1	4
4	12	9	3	6	6	6	3	0	3
5	23	12	11	6	17	6	11	0	6
6	18	13	5	7	11	7	5	0	6
7	11	7	4	4	7	3	4	0	4
8	17	14	3	9	8	8	2	1	6
9	19	17	2	13	6	12	1	1	5
10	19	17	2	13	6	13	2	0	4
11	13	12	1	7	6	7	1	0	5
12	21	20	1	16	5	16	1	0	4
SOMAS	187	142	45	96	91	92	42	3	50
PERCENT		75,9	24,1	51,3	48,7	49,2	22,5	1,6	26,7

Ainda, é possível observar que serão enviados para observação do operador 92 dos 187 lotes em questão, ou seja, 49.2% do total, significando uma economia efetiva de tempo de processamento manual.

A seguir, a título de exemplificação, serão apresentados alguns casos típicos dos resultados encontrados, selecionados dos conjuntos apresentados.

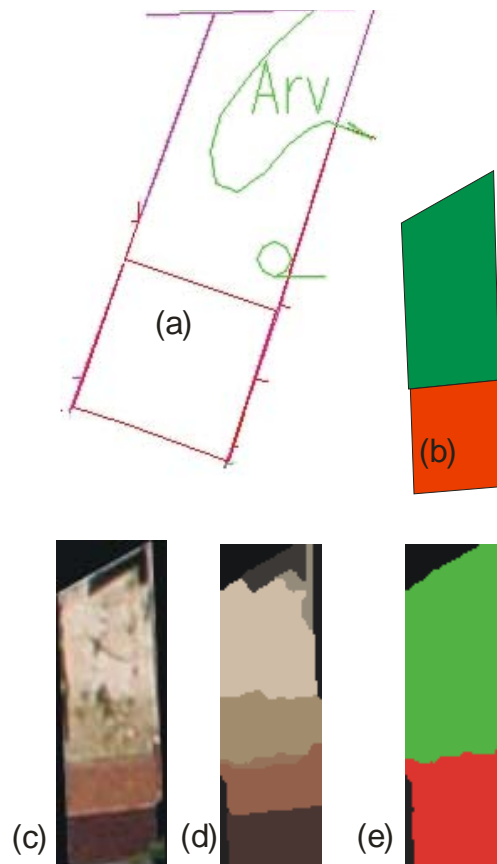
FIGURA 103 - CASO 1



Na figura 103 (a) representa a cartografia original do lote da qual resulta a imagem sintetizada mostrada em (b). Em (c) a imagem recortada de DSC06037, cuja segmentação está em (d) e a classificação da segmentação em (e). Finalmente, em (f) a sobreposição georreferenciada do contorno do objeto mostrado em (b) com o de (e) depois de aplicado operador morfológico. É nesse contexto que a distância Hausdorff vai ser determinada e a tabela de decisão aplicada.

Para esse caso VHD resultou 0,82, valor calculado para a similaridade dos prédios detectados. Como na imagem sintética não houve projeção de sombra, então a similaridade da forma da sombra evidentemente não foi utilizada. Conclui-se que, como $VHD > 0,80$ (valor limite para o caso de tolerância média), o lote é considerado como tendo sua cartografia atualizada, o que concorda com a fotointerpretação visual.

FIGURA 104 - CASO 2



Seguindo a mesma lógica, na figura 104 aparece o caso 2. Detalhadamente, nessa figura:

- (a) base cartográfica
- (b) imagem sintética
- (c) imagem
- (d) imagem segmentada
- (e) imagem classificada

O resultado de (e) está pronto para comparação com (b) e VHD nesse resulta igual a unidade, função da simplicidade do objeto em análise. Há nesse caso absoluta concordância com a observação visual. No entanto, cabe ressaltar que a decisão acerca do que era pavimento e solo na imagem (d) somente se tornou possível mediante o resultado do filtro altimétrico, ou seja, função da boa performance da correlação entre as imagens. Ainda, novamente, em função da orientação do lote e da posição do sol, não há projeção de sombras devido ao prédio no lote, com isso a análise dessa peculiaridade é desprezada.

Todos os demais casos apresentados seguem a mesma lógica. Assim não será repetida, desde aqui, a descrição dos elementos que compõem a figura.

No terceiro caso (figura 105) a forma da construção resultou altamente similar a da imagem sintética ($VHD_C = 0.98$), mas a sombra projetada no terreno não se mostrou compatível, como é evidenciado visualmente comparando as áreas em preto na imagem sintética e na imagem classificada. Esse fato, que se repete com frequência, ocorre devido a presença de uma árvore em posição crítica. Nesse caso o valor de $VHD_S = 0.19$ (distância Hausdorff medida sobre o objeto sombra). Afortunadamente, a composição de uma medida de similaridade conforme a equação 52 resulta ainda assim maior do que 0.8, devido a ponderação entre VHD_C e VHD_S . É esse outro caso de sucesso na identificação de um lote *em dia*.

FIGURA 105 - CASO 3

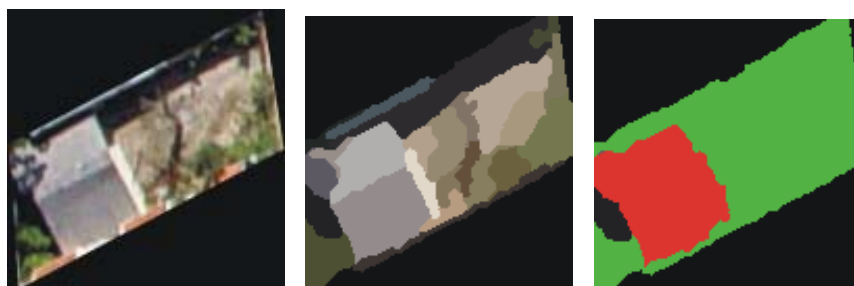
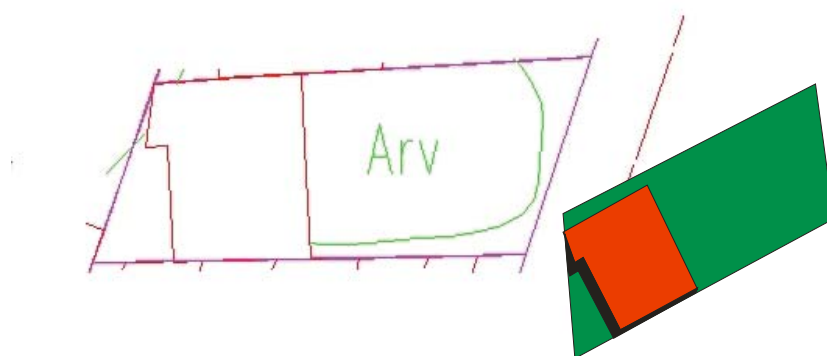
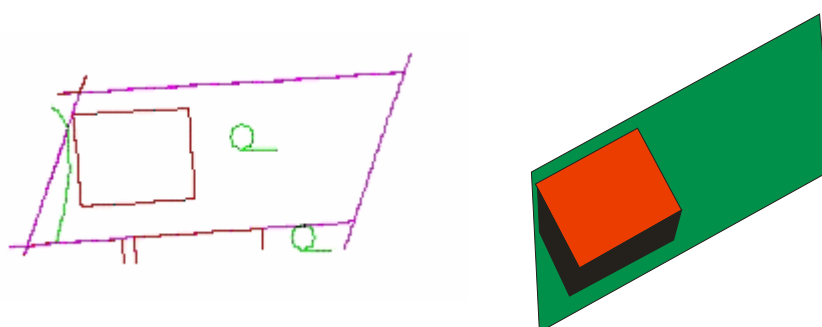


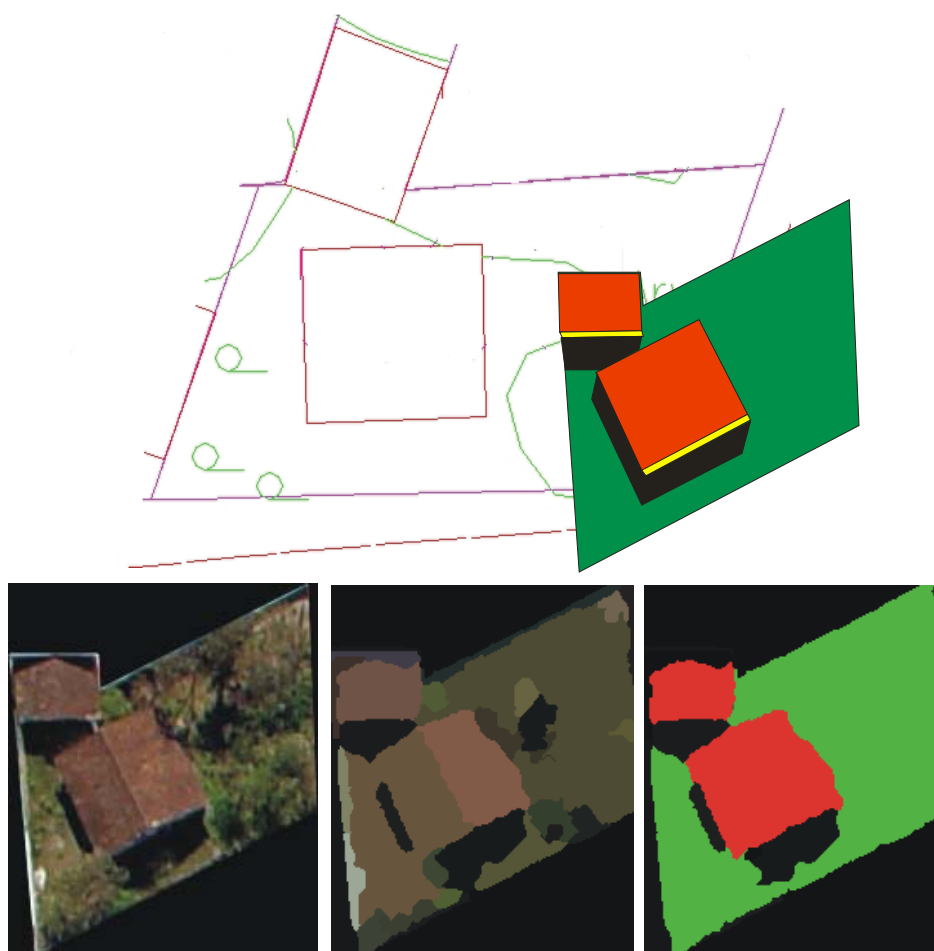
FIGURA 106 - CASO 4



Uma nova avaliação positiva do desempenho do sistema é o caso 4, apresentado na figura 106. Observe-se que uma grande árvore obstrui parcialmente a construção, mas o método de medida da similaridade é suficientemente robusto para desconsiderar essa pequena diferença, reproduzindo fielmente o que faria um fotointerprete. $VHD_C = 0,96$, confirmando essa argumentação.

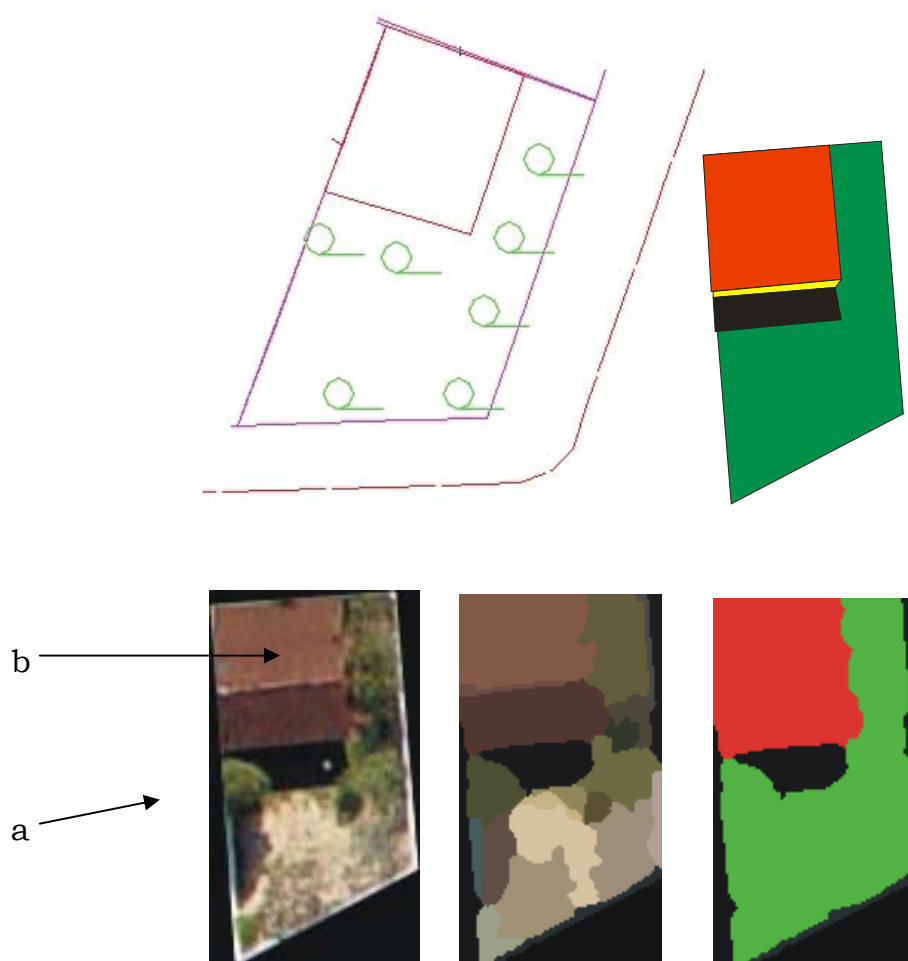
Em relação a sombra, no entanto, o sistema evidentemente percebe clara incompatibilidade e $VHD_S = 0,32$; isso porque há uma junção da sombra da construção com aquela produzida pela árvore. Ainda assim VHD_{TOTAL} resulta 0,82. A interpretação é de um lote atualizado, concordando com a observação visual.

FIGURA 107 - CASO 5



O caso 5 é relativamente mais complexo, o que se pode observar na figura 107. São duas construções num lote com presença de muitas árvores e sombras, mas sistema o resolveu corretamente. Um detalhe do algoritmo de teste da compatibilidade de sombras, evidenciado nesse caso, é que sombras isoladas das construções são desprezadas na classificação final, observe-se como a mancha preta no centro da imagem segmentada não aparece na imagem classificada, ou seja, uma região de sombra provocada por vegetação será ignorada. Para esse exemplo $VHD_{TOTAL} = 0.82$.

FIGURA 108 - CASO 6



No caso 6 (figura 108), o prédio está cercado por árvores. Logo atrás do prédio (em *a*) uma delas obstrui a sombra no solo. Em *b* é evidente a alteração da forma da construção detectada devido a presença de uma outra

árvore de grande porte. Ainda assim, $VHD_{TOTAL} = 0,86$ e o lote é assinalado como *em dia* corretamente.

Já no caso 7, da figura 109, como em tantos outros, a presença de uma grande área de sombreamento junto ao limite superior da imagem, devido a presença de árvores e do muro vizinho mostra-se crítica. Foi a observação desses casos que levou a inclusão de um novo desvio no procedimento de medida de similaridade das áreas de sombra: sempre que uma área de sombreamento possuir maior fronteira com o limite do lote do que com a construção ela será ignorada. Assim, para esse exemplo, VHD_s que inicialmente resultava 0.08, passou a valer 0.42, contribuindo para que esse lote fosse considerado *em dia* uma vez que $VHD_c = 0,94$ e $VHD_{TOTAL} = 0,84$.

FIGURA 109 - CASO 7

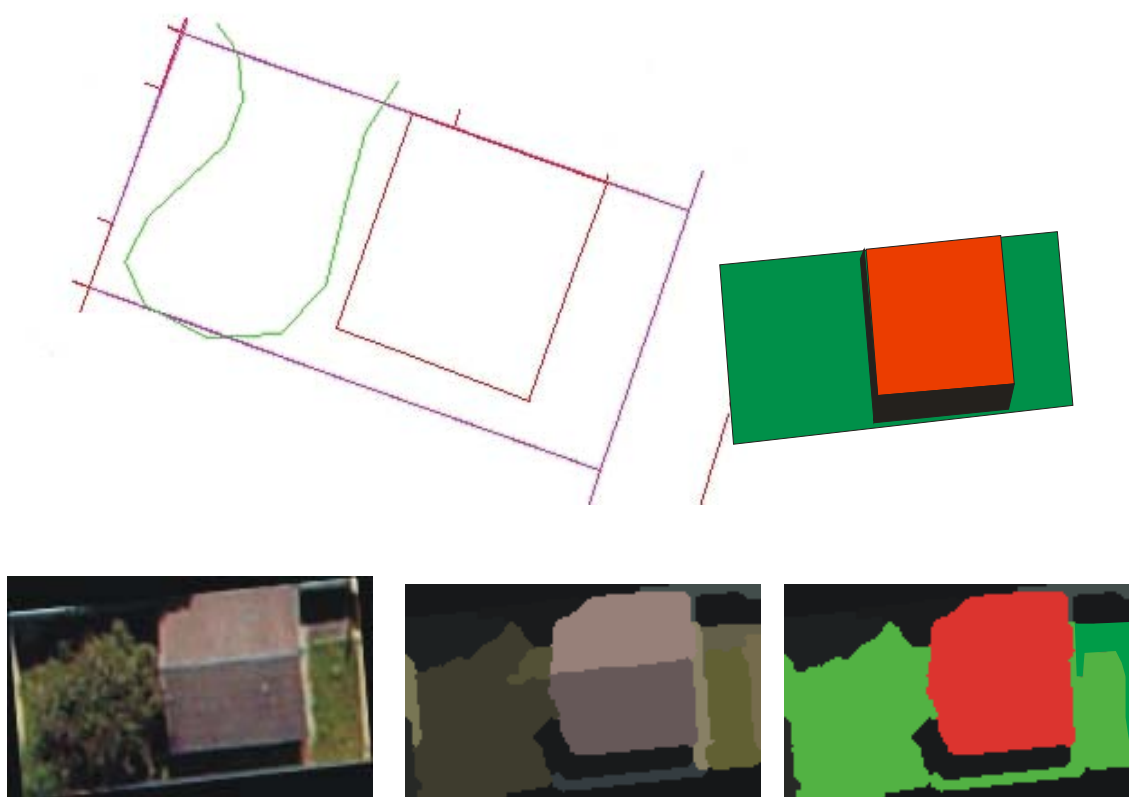
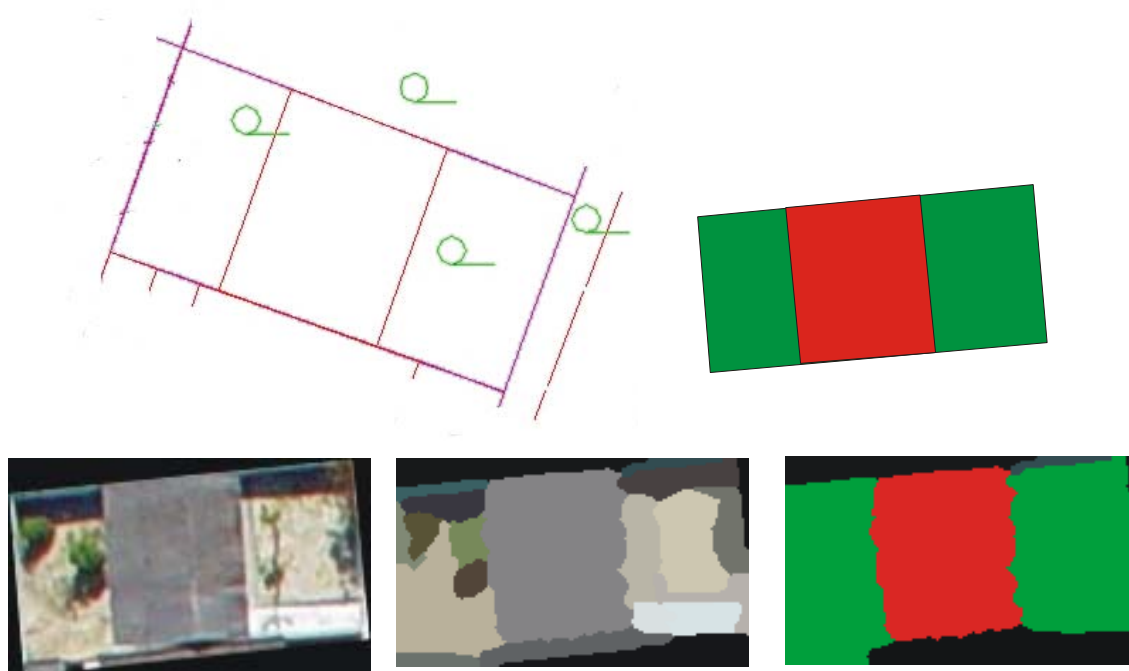


FIGURA 110 - CASO 8



Observe-se no caso 8, exibido na figura 110 a eficiência do sistema segmentador, resultando apenas 15 objetos para análise posterior. Ainda, embora já tenha sido citado, cabe ressaltar que é fundamental para o desempenho do sistema o filtro altimétrico. Sem ele não é possível discernir que objetos na imagem correspondem a telhados e que outros estão ao nível do solo. Muitos dos casos de insucesso foram contabilizados decorrente do fato de o sistema não ter encontrado valores de altitude que evidenciassem a presença de um telhado ou de um pavimento.

A partir da imagem classificada é possível visualmente perceber que a correlação com a imagem sintética resultou igual a unidade. Ou seja, comparado com a imagem sintética, nenhum ponto do contorno do objeto construção está fora da região de aceitação (máximo de 4 pixels) para o cálculo de VHD.

Outros dois casos interessantes, designados 9 e 10, mostram lotes que na base aparecem como desocupados. Na figura 111 está o primeiro deles, onde a análise da imagem também não evidencia nenhuma construção e a verificação de terreno baldio é positiva. O lote é marcado como estando *em*

dia. O caso 10 está na figura 112 e o sistema automático encontra uma construção e de pronto remete esse lote ao rol daqueles que devem ser atualizados.

FIGURA 111 - CASO 9

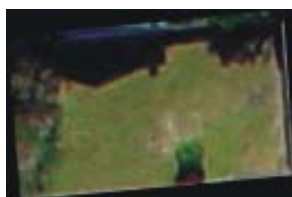
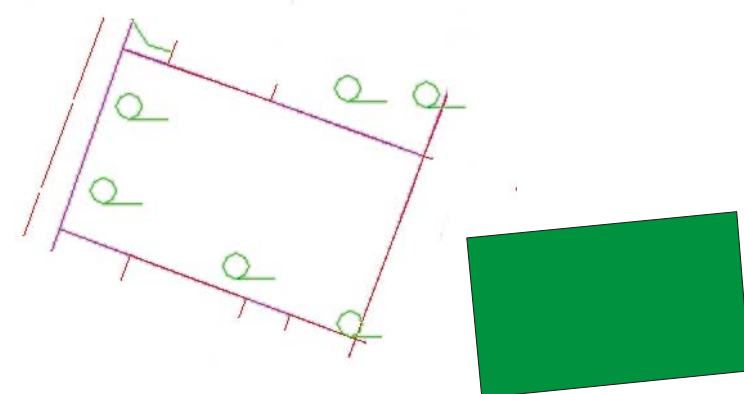
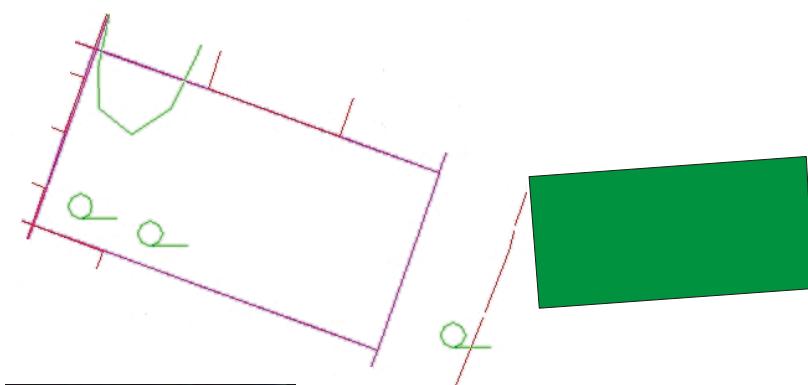


FIGURA 112 - CASO 10



A tabela 28 traz um resumo do resultado da análise de outros casos, numerados de 11 a 24 e apresentados sumariamente nas figuras 113 a 118.

TABELA 28 – ANÁLISE DOS CASOS 12 A 25

LOTE	VDH CONSTR	VHD SOMBRA	VHD FINAL	DECISÃO	STATUS
11	0,22	0,18	0,21	P/ REST.	ACERTO
12	0,32	0,12	0,28	P/ REST.	ACERTO
13	0,34	0,11	0,29	P/ REST.	ACERTO
14	0,42		0,42	P/ REST.	ACERTO
15	0,64	0,35	0,58	P/ REST.	ACERTO
16	0,18		0,14	P/ REST.	ACERTO
17			0,00	P/ REST.	ACERTO
18	0,67	0,81	0,70	P/ REST.	ACERTO
19			0,00	P/ REST.	ACERTO
20	0,72	0,31	0,64	P/ REST.	ACERTO
21	0,86		0,86	EM DIA	ERRO
22	0,55	0,28	0,50	P/ REST.	ERRO
23	0,75	0,47	0,69	P/ REST.	ERRO
24	0,30	0,11	0,26	P/ REST.	ERRO

Os casos de 11 a 20 mostram lotes onde a cartografia realmente não está compatível com a imagem e o sistema assim os detectou.

No caso 11 não há evidências na imagem do prédio maior, aparentemente em condição de demolição. Em 12 a forma da construção cartografada realmente não é similar a da imagem.

Nos casos 13 e 14 há um aumento significativo das áreas das edificações, devidamente detectada pela medida de similaridade.

Em 15 a base cartográfica mostra duas construções e o sistema registrou apenas uma, compatível com o que um foto interprete observaria. Em 16 aparece um caso inverso, a base mostra uma construção num grande lote e na imagem foram detectadas duas. Uma observação atenta a esse caso remete a ocorrência da divisão do lote.

Os lotes mostrados nos estudos de caso 17 e 18 são vizinhos, possuindo a face dos fundos do terreno em comum. A base vetorial mostra que a orientação das linhas de fundo são aproximadamente paralelas a linha de fachada. No entanto, na imagem, tal divisa é perpendicular às laterais e

mais, há uma construção exatamente nessa posição que ficou seccionada. Os dois lotes foram marcados corretamente como desatualizados.

O caso 19 é daqueles que coloca inclusive o fotointerprete em dúvida. Porém uma observação é clara, não há compatibilidade entre o que a cartografia registra e os objetos visíveis na image.

O caso 20 também é um dos tantos que apresenta difícilimo tratamento, tanto por parte de um sistema automático quanto pela fotointerpretação visual, especialmente no caso da visão monoscópica. Aparentemente trata-se de um prédio em construção. A segmentação resulta num conjunto grande de pequenas áreas homogêneas e aparentemente desconexas. Alguns desse segmentos tiveram atribuídas altitudes compatíveis com uma construção e outros não. A figura mostra o resultado da classificação anterior a aplicação da suavização de contornos pela morfologia, para que se possa visualizar o estranho efeito resultante.

O caso 21 trata um outro tipo de problema, a impossibilidade de gerar um modelo fidedigno da construção. O cadastro informa a presença de um prédio de dois andares. Mas, na realidade, somente uma pequena parte do prédio possui dois andares. Como esse detalhe da construção foi omitido na cartografia e o sistema não está preparado para resolvê-lo, o modelo tridimensional gerado produziu uma projeção não compatível com a imagem.

O caso 22 mostra um dos erros críticos, onde o sistema identificou a image como compatível com a base, mas nela há um registro de aumento da construção que não foi bem delimitado pelo segmentador, face sua similaridade com o pavimento contíguo. Ao buscar pontos homólogos na região ocorreram pontos compatíveis com solo e com telhado no mesmo segmento. A média resultou em valor intermediário insuficiente para marcar o objeto como parte da construção.

Os casos 23 e 24 são amostras de lotes marcados como incompatíveis, mas que visualmente pode-se supor estejam *em dia*. Porém, é evidente que a oclusão por árvores, a presença de grandes áreas de sombras e também a sobreposição de uma construção vizinha induziram o erro no sistema de análise das imagens.

Muitos outros casos poderiam ser citados, porém, entende-se que esses apresentados e rapidamente discutidos são suficientes para o entendimento do potencial da ferramenta e de suas principais limitações.

Um outro experimento numa área urbana mais densa foi efetuado e será sumarizado no próximo item.

FIGURA 113 – CASOS 11 e 12

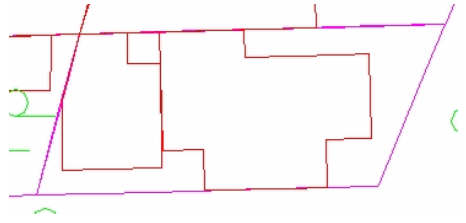



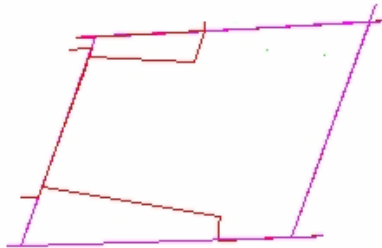



Nº	Base Cartográfica	Imagete	Resultado da Segmentação	Classificação
11				
12				

FIGURA 114 – CASOS 13, 14 e 15

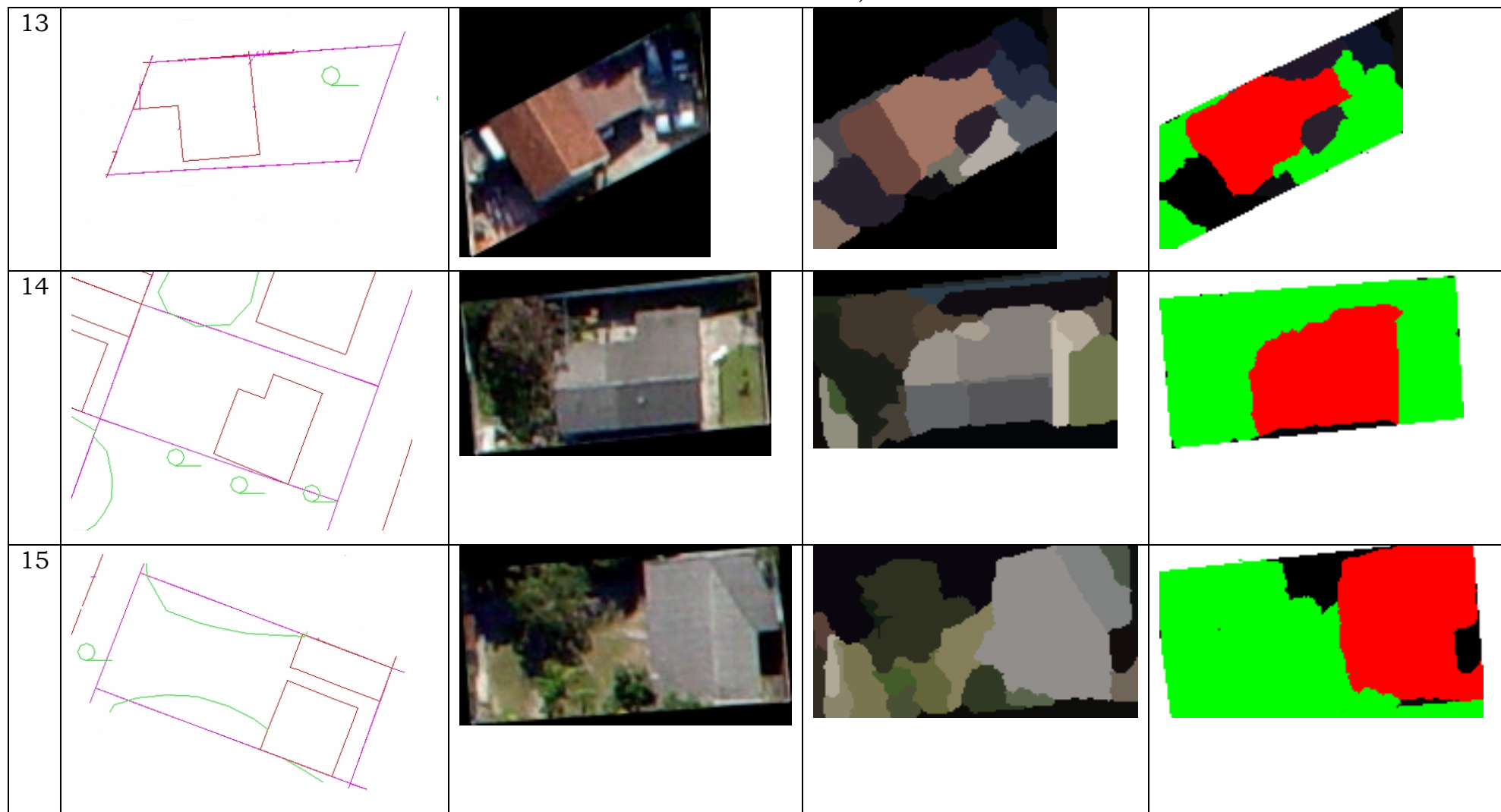


FIGURA 115 – CASOS 16 e 17



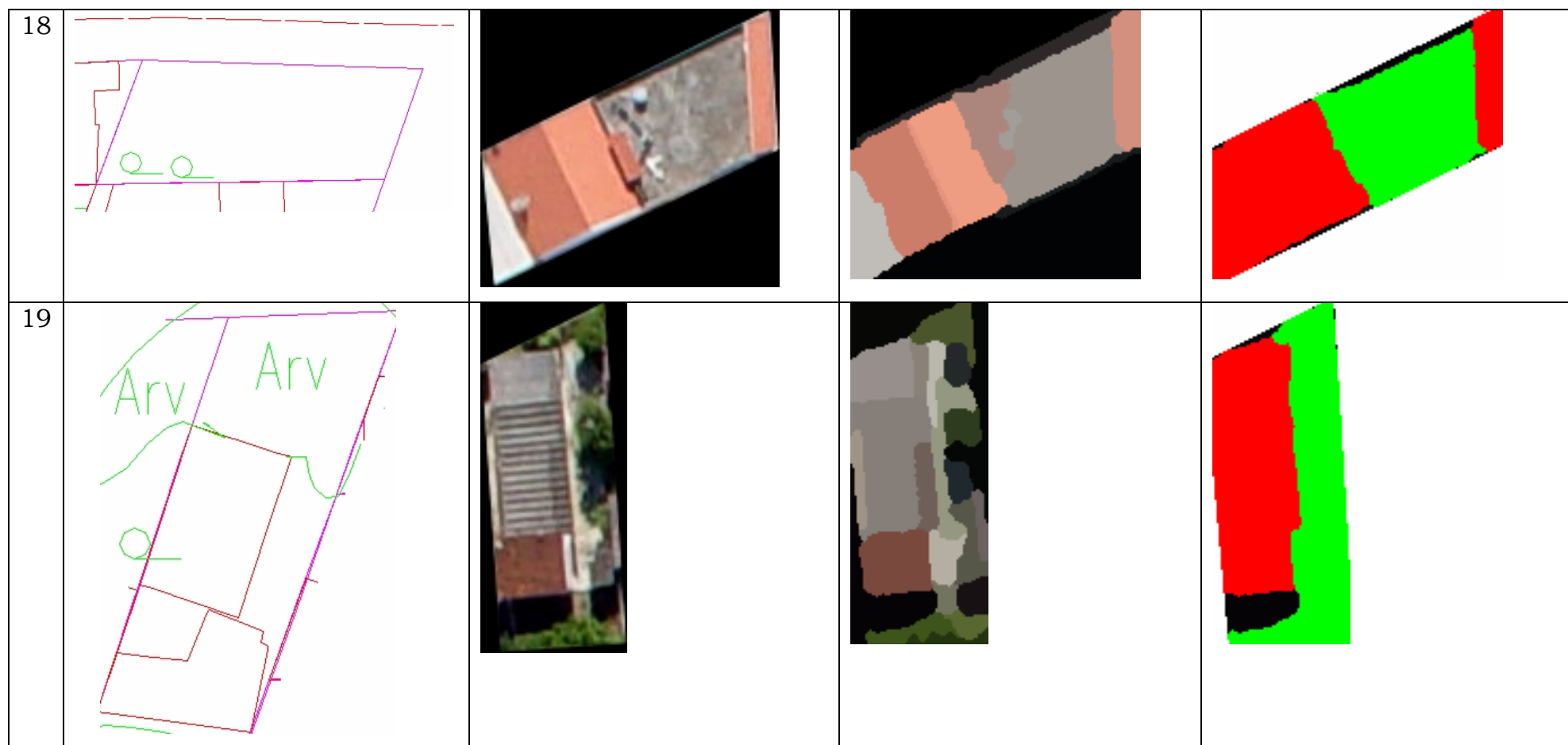


FIGURA 116 – CASOS 18 e 19

FIGURA 117 – CASOS 20, 21 e 22

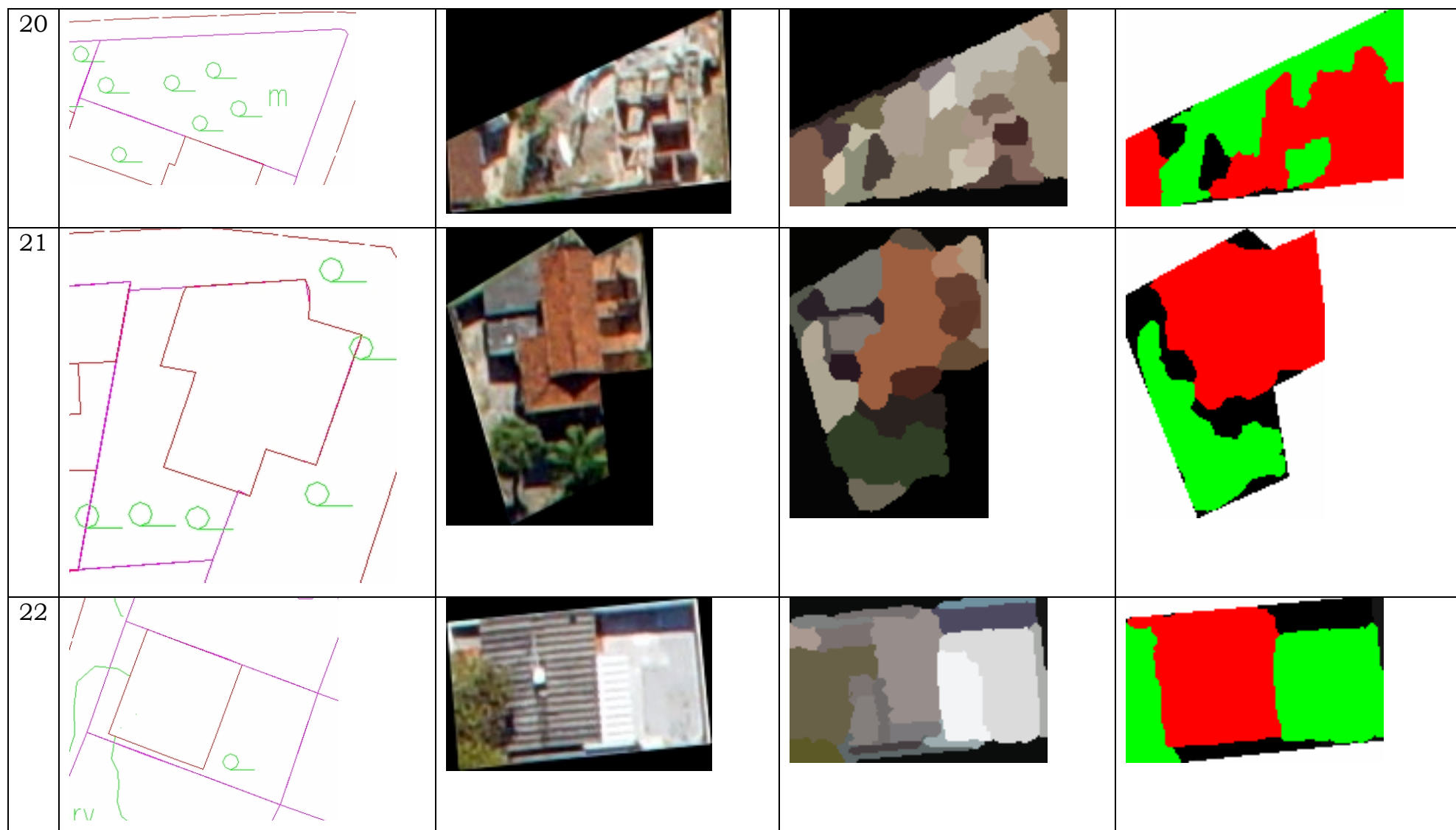
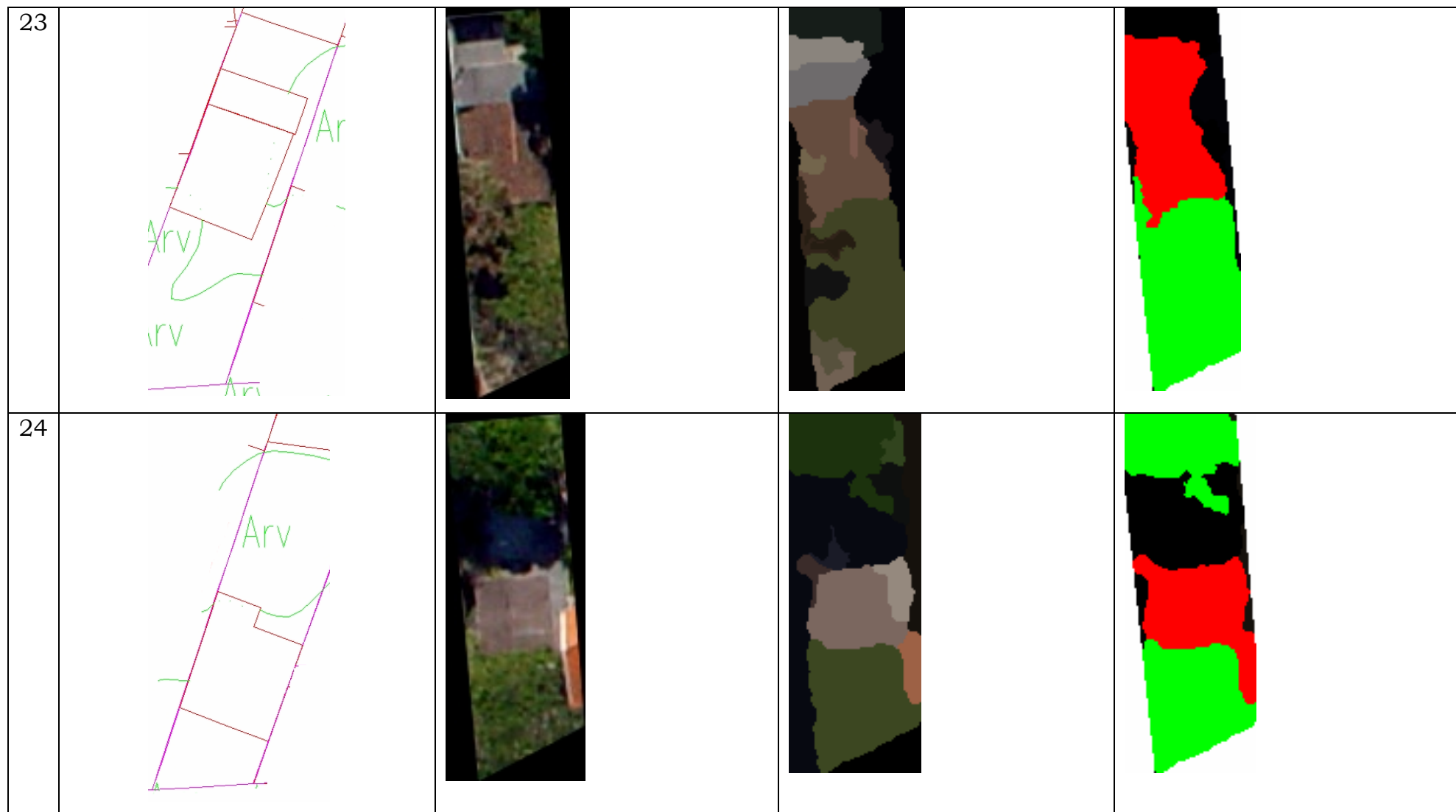


FIGURA 118 – CASOS 23 e 24



5.3. Cenários da área urbana de Pelotas – RS

A tônica dos resultados obtidos nesse novo cenário, analisados lote a lote, não diferiram muito daquelas já apresentadas e, portanto, não serão aqui detalhadas. Em relação a Matinho, no conjunto, o desempenho foi um pouco menos promissor, principalmente em função das características da região, com construções ocupando grande parcela dos lotes. Foram selecionados oito quarteirões para efetuar o teste dos algoritmos.

A figura 119 mostra uma vista da base sobreposta a uma faixa aerotriangulada e ortorretificada. O detalhe dos oito quarteirões da área de teste está mostrado nas figuras 120 e 121 na sua versão vetorial e na forma de um pequeno mosaico de imagens, respectivamente.

FIGURA 119. FAIXA DE VÔO SOBRE PELOTAS SOBREPOSTA DA BASE CARTOGRÁFICA



FIGURA 120. BASE CARTOGRÁFICA DOS OITO QUARTEIRÕES UTILIZADOS PARA
TESTE

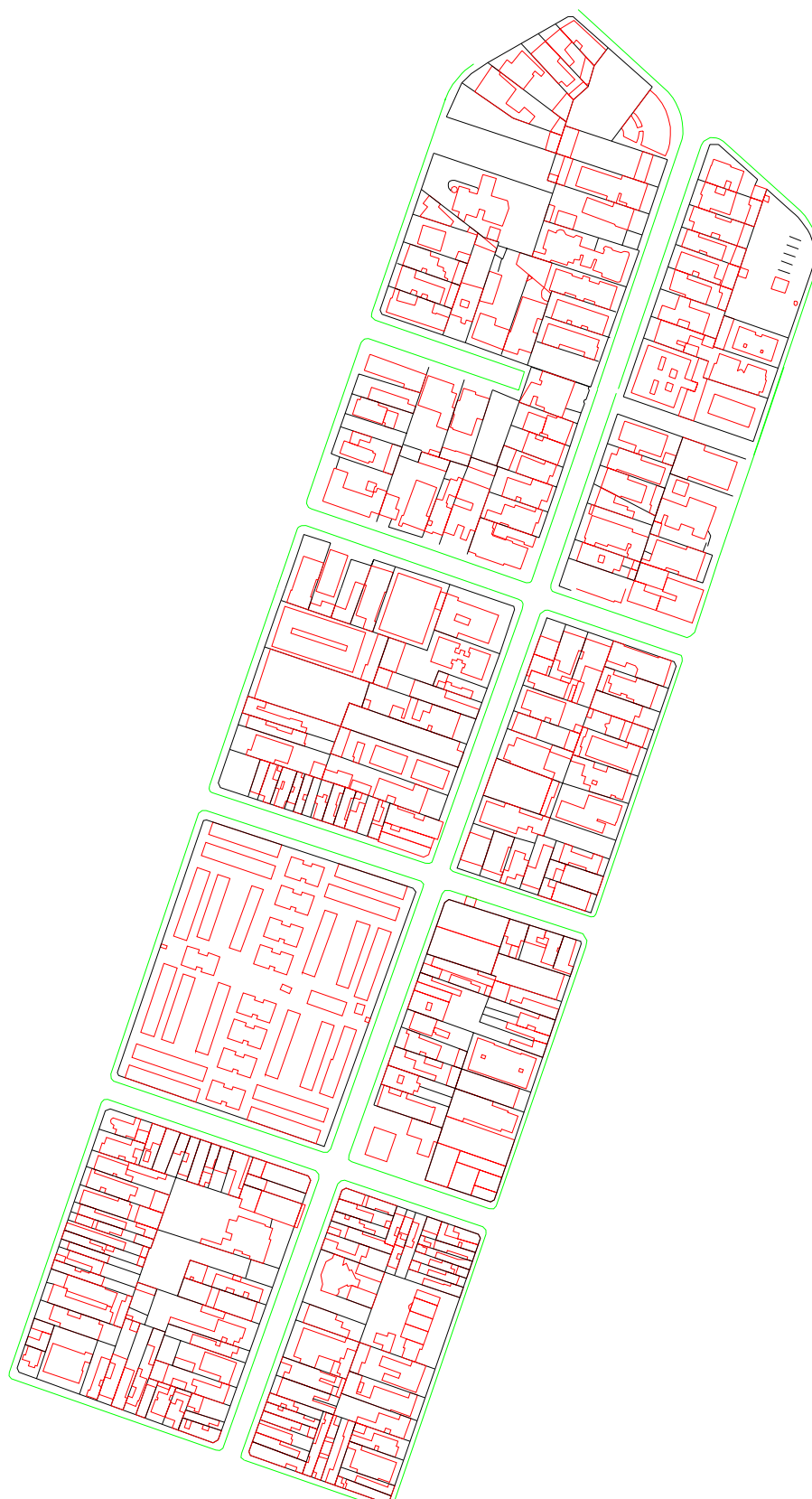


FIGURA 121. MOSAICO DE IMAGENS ORTORRETIFICADAS DOS OITO QUARTEIRÕES UTILIZADOS PARA TESTE



A tabela 29 resume o resultado obtido com a análise das imagens dos lotes. Percentualmente o desempenho é equivalente àquele mostrado para Matinhos, no entanto observe-se que serão enviados ao processo de reconhecimento visual um total de 93 lotes, enquanto somente 39 seriam necessários. Ou seja, o sistema é menos eficiente em função de ter tido menor sucesso ao identificar lotes que estão atualizados.

TABELA 29. RESULTADO DA ANÁLISE DE IMAGENS CONFRONTADO COM A FOTOINTERPRETAÇÃO VISUAL PARA O CENÁRIO DE PELOTAS

QUART.	NRO LOTES	FOTOINTERPRETE		ANÁLISE DA IMAGEM		ACERTO TIPO 1	ACERTO TIPO 2	ERRO TIPO 1	ERRO TIPO 2
		OK	A RESTIT.	OK	A RESTIT.				
1	48	42	6	24	24	24	6	0	18
2	38	32	6	21	12	19	6	2	6
3	1	1	0	1	0	1	0	0	0
4	19	17	2	7	12	6	2	1	10
5	32	24	8	19	10	19	8	0	2
6	24	14	10	7	18	6	9	1	9
7	44	40	4	32	12	31	4	1	8
8	13	10	3	8	5	7	2	1	3
SOMAS	219	180	39	119	93	113	37	6	56
PERCENT		82,2	17,8	54,3	42,5	51,6	16,9	2,7	25,6

Por sua característica particular o lote 3 da base de Pelotas merece uma consideração especial. Trata-se de um condomínio único composto de 30 prédios de apartamento. A figura 122 mostra a seqüência de processamento para análise dessa imagem, desde a construção da imagem sintética até a classificação da imagem.

A figura 123 ilustra novamente o a aplicação do algoritmo para determinação da similaridade com base na distância Hausdorff. A imagem em cinza e branco é resultante do processo de morfologia matemática aplicada aos objetos selecionados como construções da imagem classificada. Em seguida, a imagem colorida representa a transformada de distância aplicada a essa representação dos prédios e sobre ela o contorno dos mesmos objetos simulados na imagem sintética. Fica evidenciado que todos os pontos desse contorno estão sobre áreas da transformada cujo valor é próximo a zero, no máximo 6. O limite utilizado para cálculo de VHD é ainda

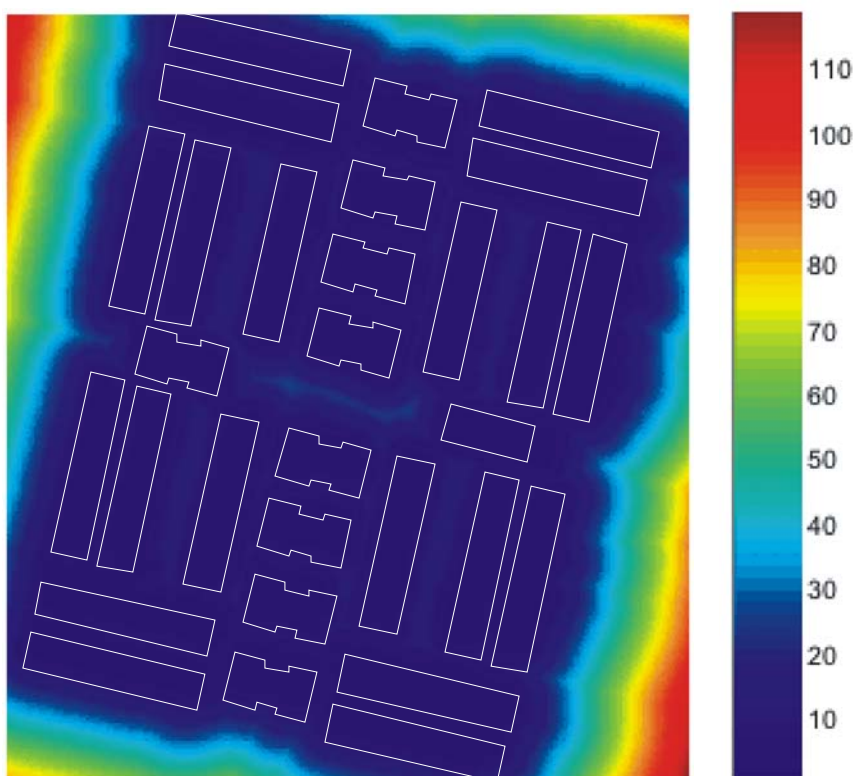
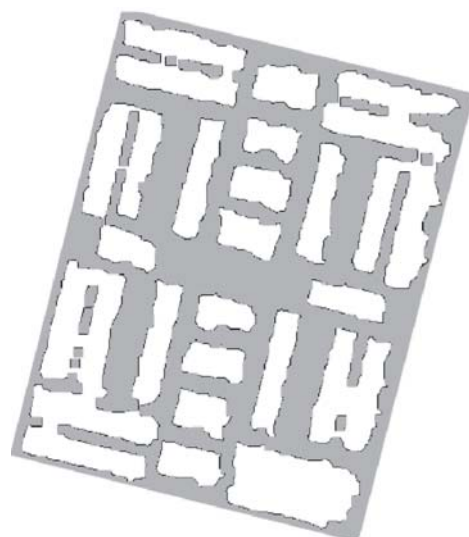
de 4 píxeis e 92% dos pontos do contorno satisfazem essa condição. Portanto, $VHD = 0.92$. O mesmo processo é aplicado em relação às áreas de sombra e VHD nesse caso vale 0.68. Assim o valor de similaridade final obtido é de 0,88 compatível com um lote atualizado.

FIGURA 122. PROCESSAMENTO DOS DADOS DO QUARTEIRÃO 3 - PELOTAS



FIGURA 123. ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DA MEDIDA DE SIMILARIDADE AO
QUARTEIRÃO 3 - PELOTAS

Área dos prédios simplificadas
por fechamento morfológico



Transformada de distância aplicada,
sobreposta das bordas dos objetos na
imagem sintética

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse foi um extenso trabalho, conforme já expresse, motivado pela convicção de que imagens obtidas pelas câmaras digitais de baixo custo hoje disponíveis no mercado podem ser empregadas em processos fotogramétricos, gerando dados fidedignos. Além, evidentemente, do valor agregado pela informação pictórica já obviamente disponível nessas imagens.

A análise do cenário da cartografia cadastral, introduzida inicialmente como elemento justificador do investimento subsequente, foi expressão da preocupação de alguns segmentos da área cartográfica com o atual tratamento que os dados geoespaciais de grande escala têm sofrido invariavelmente nas administrações públicas no Brasil. Uma breve consulta aos setores responsáveis por esses dados em algumas prefeituras do Rio Grande do Sul demonstraram que essa preocupação está plenamente justificada.

O papel dos sistemas fotogramétricos na modificação dessa realidade é evidente e a integração de sistemas de baixo custo como alternativa para as Prefeituras com menor poder de investimento parece ser providente. Justificativas contrárias a sua utilização, baseada em argumentos como imprecisão, alto custo de processamento e ameaça a Segurança Nacional estão eminentemente ultrapassados. As imagens processadas com técnicas numérico-digitais avançadas, segundo modelos cada vez mais precisos, resultam compatível com o que expressa o Padrão de Exatidão Cartográfica em vigor, especialmente em termos planimétricos para escalas favoráveis ao cadastro. Métodos semi-automatizados permitem a solução de grandes blocos de fotos em tempo razoável. Quanto a questão de Segurança Nacional não há muito mais o que se dizer quando grande parte de áreas ditas estratégicas das cidades brasileiras já estão disponíveis para visualização em qualquer computador conectado a uma rede de alto desempenho, através de

imagens de satélites de alta resolução na base de dados do sistema Google Earth©.

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa foram realizados dois vôos com câmaras digitais sobre áreas urbanas: uma em Matinhos no litoral do Paraná e outra em Pelotas no sul do Rio Grande do Sul. O vôo de Matinhos foi operado durante o desenvolvimento do trabalho de Babinski (2006) com o uso de uma câmara SONY DSC 707. No de Pelotas, através de um convênio com a Fundação Universidade do Rio Grande, utilizou-se uma câmara KODAK DCS 460.

Conforme citado, e passível de ser observado, de tais vôos resultaram excelentes imagens que permitiram a aplicação com algum sucesso dos algoritmos de análise de imagens.

O paradigma de *a priori* utilizar os dados da base cartográfica disponível para recortar as imagens aéreas orientadas espacialmente é o principal fator indutor dos resultados obtidos. Trabalhando com imagens dos lotes, normalmente consolidados sobre o domínio espacial, reduz-se significativamente o esforço de realce, segmentação e classificação das imagens, além de lógica e semanticamente a imagem recortada limitar as possibilidades de presença de objetos desinteressantes a análise final.

A geração de uma imagem sintética simplificada, onde somente as classes mais importantes (construções, sombra e terreno) aparecem permitem a comparação com a imagem processada no próprio espaço imagem.

A eficiência do algoritmo da distância de Hausdorff para medida da similaridade entre os objetos no espaço imagem foi comprovada. Foi possível determinar que tal medida pode ser aplicada com ambos os objetos no espaço imagem, ou com ambos objetos no espaço vetorial, ou mesmo com cada objeto em seu espaço original. No entanto, o algoritmo mais eficiente em termos de consumo de tempo de processamento é aquele que envolve a transformada de distância, aplicado nas imagens.

Na série suavização-segmentação-classificação está o cerne da metodologia. Evidentemente quanto melhor o resultado de processo tanto

mais adequada será a análise automaticamente efetuada pela medida de similaridade. A segmentação por Mean-Shift aplicada sobre a imagem suavizada através de filtros que preservam as bordas dos objetos apresentou muito bom desempenho. Após a segmentação objetos que ocupavam área menor do que 50 píxeis foram fundidos a seus vizinhos mais próximos (espacial e espectralmente similares) e esse parâmetro parece ter sido otimizado em função das características dos cenários abordados.

Filtrar através de operadores morfológicos binários os objetos correspondentes a prédios trouxe maior robustez ao processo, sendo eliminadas reentrâncias e irregularidades não significativas dos contornos desses elementos.

Com relação ao uso da informação das sombras provocadas pelos prédios no terreno pode-se afirmar que os resultados não foram tão promissores quanto o esperado. É esse um ponto a ser aprimorado no processo.

Com relação à eficácia da metodologia testada pode-se concluir que é cabível sua aplicação para economia de tempo de atualização, poupando o trabalho de verificação manual da condição de atualidade de cada lote. Os resultados serão evidentemente tanto melhores quanto menos complexo o arranjo de feições na área de estudo, ou seja, quanto menor a densidade de construções.

Não se faz aqui apologia a um sistema que resolve inequivocamente o problema da interpretação de imagens aerofotográficas de áreas urbanas. São visíveis as limitações e as deficiências ainda restantes. Por exemplo, o filtro altimétrico é fundamental para o sucesso da interpretação, pois a classificação final das construções somente pode ser feita mediante a atribuição de uma altitude média ao objeto segmentado. E pôde-se verificar que os valores calculados possuem grande variância, mesmo sobre pontos no solo.

Esse fato, como mencionado quando da apresentação da equação 51 no item 4.4.4 do capítulo onde se discutiu a metodologia, era previamente conhecido: a obtenção da coordenada Z sobre modelos de fotografias obtidas

por câmaras digitais de pequeno formato e baixo custo não acompanha a precisão de sua versão planimétrica.

Como o objetivo não é determinar precisamente a altura das edificações, mas no máximo indicar se o número de pavimentos da construção detectada está compatível com o presente no cadastro, o sistema respondeu com alguma eficiência. Porém, é verdade que garantir se o sistema determinou corretamente o número de pavimentos somente seria possível se uma verificação de campo fosse executada, com inspeção local de cada construção ou com medidas resultantes de imagens obtidas com câmaras métricas. Essa providência não foi tomada.

Outro aspecto em relação a altimetria é a ondulação do terreno. Todas as áreas testadas possuem pequena variação de cotas, ou seja, são bastante planas. O desempenho do sistema pode sofrer perdas significativas caso o relevo seja acidentado, exigindo-se muito mais qualidade do MNDT disponível para determinação da condição de elevação dos objetos segmentados.

Ainda, é visível um certo grau de superestimativa de acertos, em função de no cenário de Matinhos haver um grande número de lotes desatualizados na base cartográfica. Assim, falhas do algoritmo, cuja providência é a seleção do lote para atualização, foram coincidentemente incorporadas a casos de sucesso. No cenário de Pelotas, uma região onde as construções estão bem mais consolidadas e onde não há ocorrência de lotes vazios, remeteu a uma maior taxa de erros do tipo 2, onde um lote é selecionado para revisão porém está *em dia*.

Segue, finalmente, uma lista de possíveis aprimoramentos cujo estudo pode conduzir a resultados ainda mais consistentes. Tais observações são fruto dos exaustivos testes realizados:

- aproveitar integralmente a informação da base cartográfica. Num dos casos em estudo estavam disponíveis informações acerca da presença de árvores e muros e esses elementos podem ser utilizados na produção de uma imagem sintética mais real.

- trabalhar com uma descrição mais detalhada das construções. O modelo implementado gera sempre objetos prismáticos a partir da descrição dos contornos das edificações. Se informações sobre a forma do telhado estiverem disponíveis, novamente a imagem sintética pode ser enriquecida.

- no processo de classificação utilizar também medidas de textura e forma dos segmentos, o que pode ser útil inclusive no reconhecimento da própria vegetação.

- evidentemente se dados altimétricos qualificados estiverem disponíveis, como os provenientes de um sistema *lidar*, a atribuição de altitude aos segmentos ganhará significativamente em precisão e o processo de decisão tende a ser aprimorado. Porém, hoje, tal perspectiva confronta com a realidade dados os preços de tais serviços no mercado.

- remeter automaticamente os lotes marcados como alterados para um sistema de restituição semi-automático a fim de permitir a atualização dos seus dados cadastrais.

Espera-se que esse trabalho contribua para a disseminação do uso da tecnologia das câmaras digitais para mapeamento cadastral e para a eficiência dos sistemas automáticos de atualização cartográfica. Tudo isso na busca da informação qualificada, disponibilizada para o administrador público e para todo cidadão, para justa gestão do espaço onde vivemos e para que se possa ele guardar.

7. REFERÊNCIAS

- ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**, Ed. Wichmann, Karlsruhe, 1989
- ALBIN S., ROUGERON G., PÉROCHE B., TRÉMEAU A. **Quality Image Metrics for Synthetic Images based on Perceptual Color Differences** IEEE Transactions on Image Processing, 2002.
- ALVES, JOSÉ L. **São Caros Os Serviços De Aerolevantamento?** Boletim Mensal da SBC nro 49. Novembro/dezembro 2003
- AMORIM, A. **Utilização de Câmaras de Pequeno Formato na Atualização de Mapeamentos**. In: XVI Congresso Brasileiro de Cartografia, 1993, Rio de Janeiro - RJ. Anais, 1993. v. 2.
- AMORIM, A. **Utilização de Câmaras de Pequeno Formato no Cadastro Técnico Urbano**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- AMORIM, A.; TOMMASELLI, ANTONIO MARIA GARCIA ; SILVA, J. F. C. **Fotogrametria Analítica Aplicada às Câmaras de Pequeno Formato**. In: XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, 1989, Gramado RS., 1989. v. 1.
- ANDRADE, J. BITTENCOURT. **Fotogrametria**. SBEE, Curitiba, 1998.
- ANDRADE, J. BITTENCOURT. **Photogrammetric Refraction**. Ph.D. Dissertation. Ohio State University, 1977.
- AUGUSTO, MOEMA JOSÉ DE CARVALHO E PEREIRA, KÁTIA DUARTE. **A Cartografia nas Constituições Brasileiras**. COBRAC 2004 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 2004.
- BANON, G. J. F. E BARRERA, J. **Bases da Morfologia Matemática para Análise de Imagens Binárias**. IX Escola de Computação, Recife, 2004.

BABINSKI, A. P. **Determinação da Linha de Costa Através de Câmaras Digitais de Pequeno Formato, Monorestituição Digital e Técnicas GPS.** Dissertação de Mestrado, CPGCG, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BARBOSA, F. P.; MITISHITA, E. A. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato SONY DSC-F717.** Série em Ciências Geodésicas, 2003.

BARBOSA, R.L. **Geração de Modelo Digital do Terreno por aproximações sucessivas utilizando câmaras digitais de pequeno formato.** Dissertação de Mestrado, UNESP-PP, 1992.

BORGEFORS, G. **Distance transforms in digital images.** IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., vol. PAMI-8, pp. 344-371, 1986.

BRASIL – LEGISLAÇÃO. **DECRETO N.º 2.278, de 17-07-1997 - Regulamenta o Decreto-lei n.º 1.177, de 21-06-1971, que dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional, e dá outras providências.**

BRASIL – LEGISLAÇÃO. **DECRETO-LEI N.º 1.177, de 21-06-1971 - Dispõe sobre aerolevantamentos no território Nacional, e dá outras providências.**

BRASIL – LEGISLAÇÃO. **DECRETO-LEI N.º 243, de 28-02-1967 - Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá Outras Providências.**

BRASIL – LEGISLAÇÃO. **PORTARIA N.º 0637 SC-6/FA-61, de 05-03-1998 - Aprova as Instruções Reguladoras de Aerolevantamentos no território nacional.**

BRICE, C. e Fennema. **Scene analysis using regions.** Artif. Intelligence 1, 1970, 205-226.

BROWN, D. **Close Range Camera Calibration.** Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 37, n. 8, pp. 855-866, 1971.

BROWN, D. **Decentric distortion of Lens**. Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 32, n. 3, pp. 444-462, 1966.

BYRNE, ALEX E HILBERT, DAVID R. **Readings on Color - Vol. 2 - The Science of Color**. MIT Press. 2005.

CENTENO, JORGE A. S., MACHADO, ÁLVARO, M. L. E PEDRO, PATRÍCIA, DE C. **O Efeito da Compressão de Imagens no Processamento de Correlação Digital**. Série em Ciências Geodésicas. Vol. 3. Imprensa Universitária – Universidade Federal do Paraná. P. 332-344. 2003.

CENTENO, JORGE A. S., HAERTEL, Vitor . **Adaptive Lowpass Fuzzy Filter for Noise Removal**. Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, v. 61, n. 10, p. 1267-1272, 1995.

CHAMBOLLE A. AND MASO G. D.. **Discrete approximation of the MumfordShah functional in dimension two**. Math. Modelling and Numerical Anlysis, vol. 33, pp. 651–672, 1999.

CHENG, Y. Mean **Shift, Mode Seeking, and Clustering**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 17, n. 8, 1995. p. 790-799.

CLARKE, T.A. E FRYER, J.F. **The development of camera calibration methods and models**. Photogrammetric Record, 16(91): pp 51-66. 1998.

COMANICIU, D.; MEER, P. **Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002. v. 24, n. 5.

CUCCHIARA, R.; GRANA, C.; SEIDENARI, S.; PALLACANI, G. **Exploiting color and topological features for region segmentation with recursive fuzzy C-means**. In: Machine Graphics & Vision International Journal. Vol. 11 , Issue 2/3 Pag.: 169 – 182, 2002.

DIAS, SYDNEY DE OLIVEIRA. **Calibração De Câmara Digital Não Métrica – Kodak Dcs-460**. Dissertação de Mestrado. CPGCG, CEPSSRM UFRGS. Porto Alegre, 2004.

DISPERATI, ATÍLIO ANTONIO. **Obtenção e uso de fotografias de pequeno formato**. Ed. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Fundação de Pesquisas Florestais - FUPEF, Curitiba, PR, 1991.

ERBA, DIOGO ALFONSO ET ALL. **Cadastro multifinalitário como instrumento da política fiscal e urbana**. Rio de Janeiro, 2005.

FACON, JACQUES. **Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos**. Editora Universitária Champagnat. PUC-PR. Curitiba, 1996.

FAUQUEUR, J.; BOUJEMAA, N., **Region-based Retrieval: Coarse Segmentation with Fine Signature**, in IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2002.

FIG - FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DE GEÔMETRAS. **Declaração da FIG sobre o Cadastro**. CD COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário · UFSC Florianópolis, 2003.

FOLEY, J. D.; VAN DAM, A.; FEINER, S. K. e HUGHES, J. F. **Computer Graphics: Principles and Practice. Second Edition in C**. Addison Wesley, 1997.

FOLEY, J. D.; VAN DAM, A.; FEINER, S. K. e HUGHES, J. F. **Computer Graphics - Principles and Practice**. Addison-Wesley, 1990.

FUKUNAGA, K., & HOSTETLER, L. D. The estimation of the gradient of a density function, with application in pattern recognition. IEEE Trans. Inf. Theory, 21, 32–40, 1975.

GALO, MAURÍCIO. **Automação dos Processos de Correspondência e Orientação Relativa em Visão Estéreo**. Tese de Doutorado. UNICAMP, 2004.

GALO, MAURICIO e TOZZI, CLÉSIO LUIS. **Uso De Múltiplas Métricas E Rotulação Por Relaxação No Estabelecimento Da Correspondência De Pontos Em Pares De Imagens**. Séries em Ciências Geodésicas V4. Curitiba, 2004.

GALO, MAURICIO. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. Dissertação De Mestrado. Universidade Federal do Parana, Curitiba, Pr. 1993, P. 151.

GERSHON, R. **Aspects of Perception and Computation in Color Vision**. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, V32, pp. 244-277, 1985.

GOMES, JONAS E VELHO, LUIZ. **Computação Gráfica**. IMPA/SBM, Rio de Janeiro, 1994.

GONÇALVES, GLAUBER A. e MITISHITA, EDSON A. **Detecção Automática de Alvos no Processo de Calibração pelo Método das Fotos Convergentes**. I SINGEO - Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2004.

GREGOIRE, NORMAND e BOUILLOT, MIKAEL. **Hausdorff Distance between convex polygons**, Computational Geometry Web project, 1998, <http://www.cgrl.cs.mcgill.ca/~godfried/teaching/cg-projects/98/normand/main.html>

GRENN, P. J. **Understanding Digital Color**. 2nd edition. GATFPRESS. 1999.

GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Digital Image Processing**, Addison Wesley, 1992.

GRUEN, A.; KUEBLER, O. E AGOURIS, P. **Automatic Extration of Man-Made Objects from Aerial and Space Images**. Birkhäuser Verlag. 1995 .

GRUEN, ARMIN. **Automation in Building Reconstruction**. Photogrammetrische Woche, 1997.

<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo97/phowo97.htm>

GU, IRENE Y.H.; GUI, VASILE. **Color Image Segmentation using Adaptive mean Shift Filters**. Proceedings of IEEE International Conference Image Processing, ICIP 2001.

HABIB, AYMÁN; MORGAN, MICHEL. **Small Format Digital Câmeras for Mapping Applications: Calibration and Stability Analysis**. Série em Ciências Geodésicas Vol. 3. P.3-25. Curitiba, 2003.

HABIB, AYMÁN; MORGAN, MICHEL. **Stability Analysis and Geometric Calibration of Off-the-Shelf Digital Cameras**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 71, n. 6, p. 733, 2005.

HARTMANN, CARLOS; SVALDI, ARQUENATOL DEI. **Localização Das Redes De Pesca De Camarão (Saquinho) Utilizando Aerofotos Georreferenciadas: Região Estuarina Da Laguna Dos Patos, Rs, Brasil**. Revista Atlântica, Rio Grande, 24(1): 5-10, 2002.

HEIKKILÄ, J. E SILVÉN O. **A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction**. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), Puerto Rico, pp. 1106-1112, 1997.

HOLST, C. G. **Image quality: Does your detector match your optics?** Photonics, 33(1), pp. 144-146, 1999.

HUTTENLOCHER, D.P.; KLANDERMAN, G.A., RUCKLIDGE, W.J. **Comparing images using the Hausdorff distance**, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 15 (9) 850-863. 1993.

HUTTENLOCHER, D. P.; KEDEM, K.; KLEINBERG, J. M. **On dynamic Voronoi diagrams and the minimum Hausdorff distance for point sets under Euclidean motion in the plane**, to be published in Proc. Eighth ACM Symp. Computat. Geometry, 1992.

HUTTENLOCHER, D. P. ; KEDEM, K. ; SHARIR, M. **The upper envelope of Voronoi surfaces and its applications**, in Proc. Seventh ACM Symp. Computat. Geometry, 1991, pp. 194-293.

HUTTENLOCHER, D. P.; KEDEM, K. **Efficiently computing the Hausdorff distance for point sets under translation**, in Proc. Sixth ACM Symp. Computat. Geometry, 1990, pp. 340-349.

JENSEN, JOHN R.; **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**. Prentice-Hall, 1996.

KANADE, TAKEO. **Survey - Region Segmentation: Signal vs Semantics**. Computer Graphics and Image Processing 13, 279-297. 1980.

LI, JONATHAN; LI,YU; CHAPMAN, MICHAEL A.; RÜTHER, HEINZ. **Small-Format Digital Imaging for Informal Settlement Mapping** Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, Bethesda, Maryland, v. 71, n. 4, p. 435, 2005.

LIANG, XIAO; HUIZHONG, WU e ZHIHUI, WEI. **Generalized Mumford-Shah Model and Fast Algorithm for Color Image Restoration and Edge Detection**. Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics. ICIG, 2004)

LIGHT, DON. **A Basis for Estimating Digital Camera Parameters**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 70, N.3, pp. 297-300, 2004.

LIMA, OBEDE P. DE; LOCH, CARLOS. **O Uso de Câmaras Fotográficas de Pequeno Formato nos Levantamentos Cartográficos Destinados ao Cadastro Técnico Multifinalitário**. COBRAC 98 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 1998.

LIU, JUNG-KUAN; WU, HOUN-CHIEN E SHIH, TIAN-YUAN. **Effects of JPEG2000 on the information and geometry contents of aerial foto**

compression. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, V 71, N 2. 2005.

LUGNANI, JOÃO BOSCO. **Introdução a Fototriangulação.** Curitiba, 1987.

MACHADO, A. M. L. **Extração Automática De Contornos De Edificações Utilizando Imagem Gerada Por Câmara Digital De Pequeno Formato E Dados Lidar.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 2006.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS JR., R. DE LARA E BARBOSA, F. P. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato Sony DSC-F717.** Séries em Ciências Geodésicas, v. 3, pp. 2-25, 2004.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS JR., R. DE LARA. **Estudo De Caso: Correção De Erros Sistemáticos Em Câmaras Digitais Não Métricas,** Série em Ciências Geodésicas Vol. 4. 2004 (B)

MITISHITA, E. A. **Monorestituição Digital de Aerofotos Associada com Sistema de Computação Gráfica C. A. D., para Fins de Mapeamento na Área Florestal.** Curitiba. 252 p. Tese (Doutoramento em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 1997.

MITISHITA, E. A.; SILVA, VILMAR F.; SIKORSKI, JORGE. **Desenvolvimento de Técnicas de Mapeamento Fotogramétrico com Base em Imagens Digitais Tomadas com Câmara de Vídeo e Helicóptero.** Série em Ciências Geodésicas – 30 Anos de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. V-1, p. 181-198, 2001A.

MOFFIT, F. E MIKHAIL, E.M. **Photogrammetry.** Harper and Row, New York, 1980.

MONICO, JOÃO FRANCISCO GALERA. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS – Descrição, fundamentos e aplicações**. Editora UNESP, 2000.

MOSTAFA, OHAMED M.R.; HUTTON, JOE. **A Fully Integrated Solution for Aerial Surveys: Design, Development, and Performance Analysis**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 71, n. 6, p. 391, 2005.

MUMFORD, D. e SHAH, J. **Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems**. Comm. Pure Applied. Math., 42:577–685, 1989.

NAGAO, M. e MATSUYAMA, T. **Edge preserving smoothing**. Computer Graphics and Image Processing, vol. 9, pp. 394-407, 1979.

NEMCSICS, A. **Color Dynamics**, Publisher Akademiai Kiad, Budapest, 1993.

OHLANDER, R. **Analysis of Natural Scenes**. Ph.D. thesis, Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, 1975.

OHTA, Y.; KANADE, T. e SAKAI, T. Color information in region segmentation. Computer Graphics and Image Processing. Vol. 13, pp. 222-241, 1980.

ORRITTE, CARLOS; HERRERO, J. ELIAS. **Shape matching of partially occluded curves invariant under projective transformation**. Computer Vision and Image Understanding, 34–64. p. 603-619, 2004.

PAGLIERONI, D.W.. **Distance transforms: Properties and machine vision applications**. Comput. Vision Graphics Image Processing: Graphical Models Image Processing, vol. 54, no. 1, pp. 56-74, 1992.

PEREIRA, KÁTIA D., CLÁUDIO, AUGUSTO, MOEMA JOSÉ DE C., DOS SANTOS, JOÃO BARRETO e FREITAS, ANNA LÚCIA. **Atualização Da Legislação Cartográfica – Necessidade Nacional**. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas 2003

PETROU M., MIRMEHDI M., AND COORS M. **Perceptual smoothing and segmentation of colour textures**. In: Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision, pages 623--639, Freiburg, Germany, 1998.

PREOSKI, ROBERTO. **Otimização da Restituição Fotogramétrica digital e a resolução geométrica da Imagem**. Dissertação de Mestrado. CPCG – UFPR, 2006.

REDA, I.; ANDREAS, A. **Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications**. 55 pp.; NREL Report No. TP-560-34302, 2003.

REZENDE FILHO, FERNANDO VIEIRA DE. **Mosaico Digital Semi-Controlado Obtido De Aerofotos Coloridas Não Métricas**. Monografia de Especialização em Geoprocessamento. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

SALES DIAS, JOSÉ MIGUEL; BASTOS, RAFAEL; CORREIA, JOÃO e VICENTE, RODRIGO. **Semi-Automatic 3D Reconstruction of Urban Areas Using Epipolar Geometry and Template Matching**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 21, pp 466–485, 2006.

SANTOS JR., R. DE LARA **Calibração de Câmaras Digitais Não-Métricas e de Pequeno Formato Utilizando o Píxel como Unidade no Espaço Imagem**. Seminário de Tópicos Avançados em Fotogrametria. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Curitiba, 2003.

SCHOTT, JOHN R. **Remote Sensing: The image Chain Approach**. Oxford Univ. Press, New York, 1997.

SCHUMACHER, DELAMAR HELENO. **Metodologia de Produção de Mapas para o Cadastro Técnico Multifinalitário a partir de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato, Controle Terrestre e Geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado – Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC, 1995.

SHEN, J. **A Stochastic-Variational Model for Soft Mumford-Shah**

Segmentation. International Journal of Biomedical Imaging. Article ID 92329, Vol. 2006.

SHEN, J. **Convergence approximation to piecewise constant Mumford-Shah segmentation.** Lec. Notes Comp. Sci., 3708:499–506, 2005.

SCHENK, A.F., 1996. **Automatic Generation of DEM's.** In Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry. pp. 145-150. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland.

SILVA, DANIEL CARNEIRO DA; MELO, IVAN DORNELAS FALCONE DE; E OLIVEIRA, ROBERTO NERES QUIRINO DE. **Alta resolução com uso de câmaras digitais de baixo custo para mapeamento.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, p. 4561-4568. Goiânia, 2005.

SOMBOONKAEW, A.; CHITWONG, S.; CHEEVASUVIT, F.; DEJHAN, K. e MITATHA S. **Segmentation on the Edge Preserving Smoothing Image.** Asian Conference on Remote Sensing, 1999. (versão digital disponível em <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/index.htm>)

SONKA, MILAN; HLAVAC, VACLAV E BOYLE, ROGER. **Image Processing, Analysis, and Machine Vision.** PWS Publishing. 1999

SONY INC. F828 User Manual. 2006

SOUZA, GENIVAL CORRÊA DE. **Análise de Metodologias no Levantamento de Dados Espaciais para Cadastro Urbano.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2001.

SUVEG, ILDIKO; VOSSELMAN, GEORGE. **Automatic 3D Building Reconstruction Three-Dimensional Image Capture and Applications V,** Brian D. Corner, Roy P. Pargas, Joseph H. Nurre, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4661 (2002)

TOMITA, F. e TSUJI, S. **Extraction of Multiple regions by smoothing in selected neighborhoods.** IEEE Trns. Systems, Man and Cybernetics SMC-7, pp.107-109, 1997,.

TOMMASELLI, A. M. G. ; REISS, M. L. L. **A Photogrammetric Method For Single Image Orientation And Measurement.** Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, Bethesda, Maryland, v. 71, n. 6, p. 727-732, 2005.

TOMMASELLI, A. M. G.A; **Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3d a curta Distância.** Geodésia on line, 4/2003.

TOTH, C. K.. **Image Compression in Photogrammetric Prattice.** In: Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS, 1998.

TRÉMEAU, ALAIN e COLANTONI, PHILIPPE. **Regions Adjacency Graph Applied To Color Image Segmentation.** IEEE Transactions on Image Processing, 2000.

XIAOZHOU, YU. **Hausdorff Distance for Shape Matching.** Lecture Notes disponível em:

http://www.cemnet.ntu.edu.sg/presentation/slides_yuxiaozhou.pdf.

ZHANG Z., 1998. **A Flexible New Technique for Camera Calibration.** Technical Report MSRTR-98-71, Microsoft Research.

Páginas acessadas e referenciadas:

Amobe Project

http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/AMOB_E/amobe_I/recons_intro.html

CIE

<http://www.cie.org>

Comaniciu – Página pessoal

http://www.caip.rutgers.edu/~comanici/segm_images.html.

Claten

<https://www.defesa.gov.br/cartografia/index.php?page=aerolevantamentos>

Concar

<http://www.concar.ibge.gov.br/indexb43c.html>

EasyRGB

<http://www.easyrgb.com>

FIG

http://www.fig.net/figtree/commission7/reports/cadastral/statement_on_cadastral.html

IBGE

<http://www.ibge.gov.br>

ICC

<http://www.color.org>

National Renewable Energy Laboratory:

<http://www.nrel.gov/>

HyperPhysics

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

JPEG

<http://www.jpeg.org>

Pixcellent

<http://www.pixcellent.com>

PROCIG

<http://www.procig.org/downloads/brazil.pdf>

Solar Calculator - NOAA

<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azel.html>

Standard RGB Color Spaces.

<http://ivrgwww.epfl.ch/publications/sbs99.pdf>

Swinburne <http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/colour/colourspace/>

University of Oregon:

<http://solardat.uoregon.edu/SolarPositionCalculator.html>

<http://research.microsoft.com/~zhang/Calib/>

A N E X O S

ANEXO 1 – CONJUNTO DE AJUSTES A SEREM UTILIZADOS NUMA CÂMARA SONY F-828 PARA SEU USO EM AEROFOTOGRAMETRIA

Os procedimentos abaixo listados garantem qualidade ao produto fotográfico digital adquirido e permitem a otimização geométrica dos resultados da análise das imagens. São eles:

- Colocar o foco no modo manual. Câmaras que dispõem de funções de autofocagem, em geral valendo-se de distanciômetro infravermelho, devem ter esse recurso anulado.

- Colocar a objetiva na posição de foco no infinito. Uma vez que o foco tenha sido colocado em modo manual o anel de focagem deve ser deslocado para a posição limite de afastamento do alvo (foco no infinito). Com isso garante-se que a distância focal seja igual a distância do centro óptico da câmara até o plano do CCD e que a imagem forme-se focada nesse plano. Obviamente, no caso da aerofotogrametria, o objeto está bastante afastado da lente. Fisicamente, lembrando, a expressão de Gauss (Eq. 53) está sendo levada ao limite em que $o = \infty$ e com isso $f = i$.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (53)$$

onde f é a distância focal, o a distância do objeto ao centro óptico das lentes e i a distância do centro óptico das lentes ao plano da imagem.

- Desabilitar a função de zoom digital.
- A lente zoom da câmara deve ser fixa em posição equivalente ao modo normal da objetiva e que facilite a obtenção de um valor de F compatível ao calculado anteriormente.

Relembrando conceitos elementares da fotografia, uma lente normal é aquela que projeta uma cena aproximadamente igual à perspectiva humana dos objetos do mundo real. Não nos produzirá impressões de aumento ou redução dos objetos e não nos ampliará nem restringirá o ângulo de abertura. A determinação da normalidade depende da relação entre a

distância focal e a diagonal da área do plano sensor. Nas câmaras fotográficas analógicas comuns costuma-se utilizar um filme 36x24 mm, cuja diagonal vale 43 mm. Os fabricantes de lentes sem zoom costumam utilizar $f = 50$ mm. Dada alguma tolerância consideram-se normais as lentes cujas distâncias focais variem entre 35 e convencionais 65 mm.

No caso em análise trata-se de uma lente Carl Zeiss Vario Sonar T*, com distâncias focais entre 28 e 200 mm, quando considerados seus equivalente a uma câmara 35 mm. Na realidade os valores de distância focal variam aproximadamente entre 7 e 50 mm. Os chamados equivalentes 35 mm são calculados em função da proporção entre a diagonal do ccd e a diagonal do filme utilizado nas câmaras 35 mm. Um filme 135, normalmente utilizado, como se disse possui diagonal de 43 mm. O CCD da câmara possui 8,8 x 6,6 mm. A relação entre diagonais vale 3,9 que multiplicados pelas distâncias focais reais resultam nos chamados equivalente 35 mm.

Assim, o anel de zoom da F828 deve ser fixo em alguma posição que resulte distância focal próxima a 11 mm (aceitando-se uma tolerância em torno de 2 mm para mais ou para menos) a fim de obter imagens normais. Na graduação existente no entorno do anel de zoom implica em se assinalar valores ente 35 e 60 mm.

É recomendável que se utilizem meios para fixar o anel nessa posição. Seja pelo uso provisório de fitas aderentes ou pela perfuração cuidadosa do tambor para fixação por microparafusos autoatarrachantes, garantindo que a distância focal utilizada na calibração não se altere.

- O máximo da capacidade do sensor deve ser explorada. No modo *setup* da câmara deve-se assinalar a opção de maior quantidade de pixels possível, ou seja, 3264x2448, resultando 8 Mpixels.

- A câmara possui dois modos de qualidade de imagem. Um denominado *standard* e outro *fine*. A distinção entre ambos está na metodologia de reamostragem do sinal. O modo *fine* é o mais recomendado embora consuma mais tempo de processamento interno do sistema sensor e mais memória de armazenamento. Se a quantidade de memória disponível for crítica, o modo *standard* pode ser utilizado.

- Preferencialmente configurar a câmara para gravar os arquivos imagem no formato RAW. Assim os dados brutos capturados pelo sensor serão armazenados otimizando o processamento digital posterior. Pode-se ainda optar pelo formato TIFF, padrão internacional para transferência de imagens. Nesse formato, os dados não sofrem compactação e, portanto, não possuem perdas em relação a informação medida pelo CCD.

Esses formatos exigem, no entanto, alta capacidade de armazenamento de dados. A tabela 30 mostra a relação entre a quantidade de imagens comportadas por um microdrive de 2 Gb nos formatos acima citados e no formato JPEG, modo *default* da câmara.

TABELA 30 – NÚMERO DE IMAGENS ARMAZENADAS EM UM MICRODRIVE DE 2GB EM FUNÇÃO DO FORMATO DO ARQUIVO

Formato	Número de imagens armazenadas em um microdrive de 2 Gb
JPEG	494
TIFF	76
RAW	100

Cabe citar que o formato JPEG possui inconvenientes importantes em relação ao processamento digital da imagem, dificultando a segmentação, em função da compactação pseudo-visual e do algoritmo tipo *split* recursivo utilizado na compressão da imagem.

Para levantamentos de maior porte essa limitação de armazenamento é crítica. O que pode impor a necessidade de se optar por gravar imagens JPEG. Ou se deve prever alternativas como o aproveitamento do tempo de retomada entre faixas para substituição do microdrive e/ou transferência das imagens para um computador portátil. A construção de uma interface direta para um computador ou a disposição no mercado de dispositivos de

armazenamento mais poderosos seriam, nesse caso, melhor solução para o problema.

- Ajustar a configuração de sensibilidade do sensor, por padronização de procedimentos feita por equivalente ISO dos filmes fotográficos, para o valor 100 ou 200. Nesse intervalo tem-se suficiente sensibilidade para a alta velocidade de obturação a ser selecionada e preserva-se qualidade da imagem. Atentar para que os modos de sub e sobre exposição estejam compensados em 0 eV (zero elétron-volts).

- No modo *White-balance* selecionar o branco de referência equivalente ao modo sRGB, ou seja, aquele correspondente a uma fonte ideal a 6500K. No caso dessa câmara deve ser selecionado o modo Cloudy (nublado). O modo Daylight (luz do dia) também pode ser escolhido, porém nesse caso o padrão de temperatura de brilho correspondente a 5500 K passa a ser a referência, no caso correspondente ao branco D55 do CIE.

- Sincronizar o relógio interno com o relógio GPS, dentro da precisão do segundo. Esse procedimento pode auxiliar a obtenção de valores para posição da aeronave no instante da obturação em vôos apoiados por GPS. Cuidar, no entanto, para que a opção de registro sobre a foto de data e hora estejam desabilitadas, evitando a presença desses caracteres sobrepostos a cena.

- Selecionar o modo de operação totalmente manual da câmara. Isso desabilita funções automáticas relacionadas ao fotômetro e permite a programação completa das propriedades de operação da objetiva, ou seja, o controle de abertura do diafragma e de velocidade de obturação.

- Programar a abertura máxima do diafragma, ou seja, F entre 2,0 e 4,3 e a velocidade de obturação em 1:1000 s. Observe-se que o valor de F deve obedecer ao critério de qualidade da imagem anteriormente calculado para essa câmara. Com alta velocidade de obturação garante-se não significativo efeito de arraste na imagem devido ao movimento da aeronave.

- Desligar o display de cristal líquido onde são apresentadas as imagens capturadas, as opções de configuração e interface do sistema. Esse procedimento é fundamental para preservar as baterias permitindo maior

longevidade dos levantamentos. Câmaras como a F-828 podem operar de forma autônoma por 2 horas consecutivas quando configuradas como acima descrito.

ANEXO 2 – CÓDIGO EM C++ DAS FUNÇÕES UTILIZADAS COMO INTERVALÔMETRO

O código abaixo permite que o relógio interno de um computador controle o tempo de obturação da câmara nos experimentos aerofotogramétricos. Foi desenvolvido em C++, sendo pois portátil para a maioria das plataformas.

```
using namespace std;
#include <ctime>
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include "timer.h"
using namespace KW_CRONO;

double crono::tempo_decorrido()
{
    clock_t agora = clock();
    return double(agora - t0) / FREQ_INTERNA_CPU;
} // crono::tempo_decorrido

void crono::start(const char* relógio)
{
    if (flag_relogio)
        return;
    flag_relogio = 1;
    t0 = clock();
} // crono::start

double crono::verif(const char* relógio)
{
    if (flag_relogio)
        return tempo_acum + tempo_decorrido();
    return tempo_acum;
}
```

```
} // crono::verif

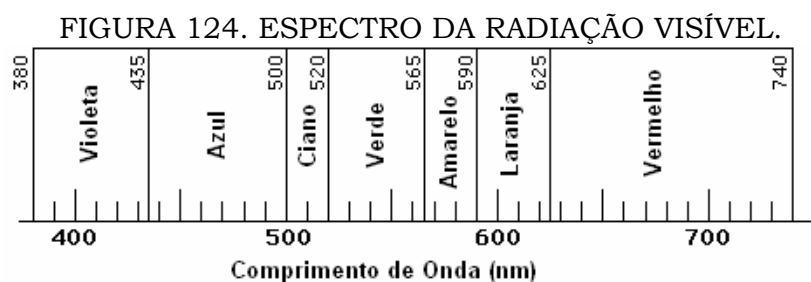
void crono::restart(const char* relógio)
{
    tempo_acum = 0;
    flag_relogio = 1;
    t0 = clock();
} // crono::restart

void crono::stop(const char* relógio)
{
    if (flag_relogio)
        tempo_acum += tempo_decorrido();
    flag_relogio = 0;
    cout.setf(ios::fixed, ios::floatfield);
    setprecision(4);
    cout << "Finalizada contagem [" << relógio << "] : "
        << tempo_acum << endl;
}
```

ANEXO 3 – FUNDAMENTOS DE CORES

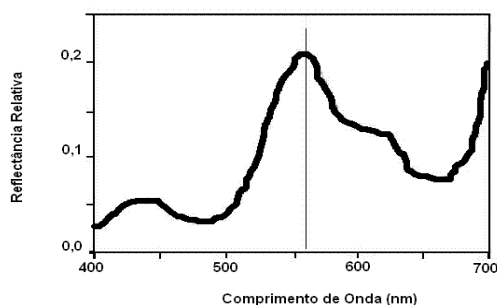
As páginas seguintes remetem à uma revisão bibliográfica do conceito de cor e às suas principais aplicações na área de processamento de imagens.

Basicamente, o conceito físico de cor está diretamente relacionado ao comprimento de onda da radiação eletromagnética. Assim, um feixe de luz monocromático emitido por um laser hélio-neon é vermelho, pois a radiação de 632 nm que se propaga a partir de sua excitação é assim qualificada, se considerarmos os limites de classificação das cores apresentado no diagrama da Figura 124.



Porém, raramente a radiação que nos chega aos olhos é monocromática. Em geral, é um sinal contínuo no espectro que abrange uma larga banda de comprimentos de onda, como mostra a Figura 125.

FIGURA 125. TÍPICO ESPECTRO PARA UMA DETERMINADA COR.



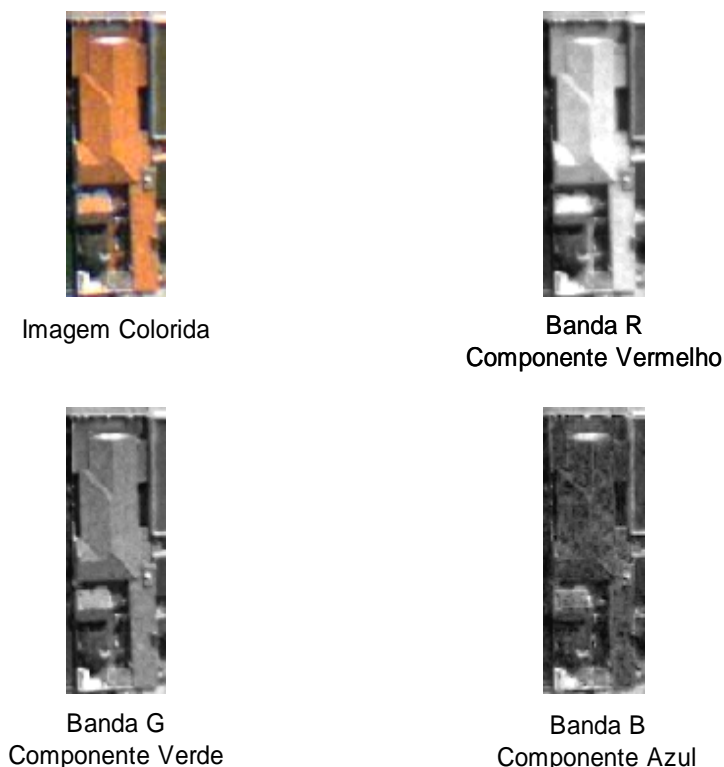
Ainda assim, qualificamos qualquer sinal luminoso como de uma determinada cor e para isso estamos utilizando uma generalização que é produto de nossa percepção e está relacionada com o poder de síntese de nosso sistema visual, que possui um conjunto complexo de células fotossensíveis. Observe-se, pois, que há dois diversos conceitos aplicáveis ao reconhecimento das cores: quando um observador afirma que duas amostras possuem a mesma cor está utilizando apenas sua capacidade psicofisiológica e essas cores são ditas metaméricas; quando se possui o espectro dos sinais e esses são idênticos, essas cores são ditas isoméricas. Em outras palavras, fisicamente, duas cores somente são iguais quando possuem o mesmo espectro. Ainda, o homem percebe diversos sinais como possuindo a mesma cor e essa sua própria percepção é conhecida como mismerismo.

Esse conceito é importante quando traduzido para a tecnologia de imageamento e análise das imagens. Os dispositivos sensores são construídos para apresentarem versões eletrônicas digitais da visão. Assim, inspirados no sistema triestímulo amostram o espectro radiométrico, gerando três imagens monocromáticas, que quando exibidas simultaneamente em dispositivos como monitores, ou quando impressas, apresentam-se muito similar à percepção da cena real por um observador padrão. A cada estímulo, a banda da imagem é composta, normalmente centrada em comprimentos de onda que a visão humana predispõe e classifica como vermelho, verde e azul e que foram padronizadas pelo CIE. A Figura 126 ilustra o processo.

A resposta de cada banda é obtida normalmente por filtros com pigmentos que também estão relacionados àqueles presentes nos cones, células fotossensíveis às cores, presentes na retina do olho humano.

No armazenamento permanente das imagens, efetuado pelo processamento residente nas câmaras ou pelos sistemas computacionais de processamento das imagens, também é explorado o mismerismo. Técnicas de compressão de dados são aplicadas tendo em vista o fato de que um observador não vai conseguir distinguir tamanha variedade de cores, como aquelas geradas pelos dispositivos imageadores.

FIGURA 126. UMA PEQUENA IMAGEM COLORIDA E SUAS BANDAS DAS CORES PRIMÁRIAS.



É importante salientar que tais técnicas, conhecidas como compressão psicovisual, aplicadas seletivamente por modelos como o do JPEG (Joint Photographic Experts Group, JPEG Site, 2006), podem influenciar o desempenho de algoritmos automáticos para segmentação, classificação e correlação das imagens, como descrito por Liu, (2005), Centeno, (2003) e Toth, (1998). Deve-se, portanto, avaliar o custo-benefício de se utilizar a compressão de imagens sabendo-se que haverá prejuízo para a informação.

Quantificar as cores dos objetos exige o estabelecimento de um sistema de referência para a medida que os sensores fazem sobre amostras da radiação refletida pelos objetos. Os mais conhecidos sistemas de referência são baseados no trabalho dos pesquisadores britânicos John Guild e W. D. Wright, que muito antes do conhecimento detalhado da visão humana determinaram que seria possível identificar todo o espectro de cores

pela combinação da resposta de três cores primárias (sistema triestímulo). Essas conhecidas *Matching Functions* são mostradas na Figura 127.

Os valores em destaque na mesma Figura (435,8 546,1 700,0) são os comprimentos de onda da radiação eletromagnética monocromática que quando combinados produzem as demais cores, segundo um conjunto padrão de observadores. Esse é o sistema de cores mais comumente aplicado na computação, conhecido como padrão RGB e mostrado na Figura 128.

FIGURA 127. FUNÇÕES *MATCHING* PARA O SISTEMA TRIESTÍMULO.

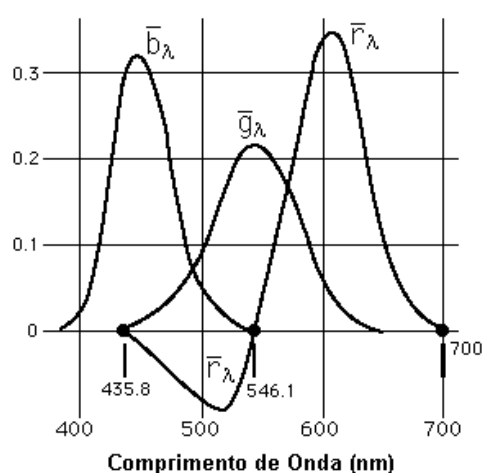
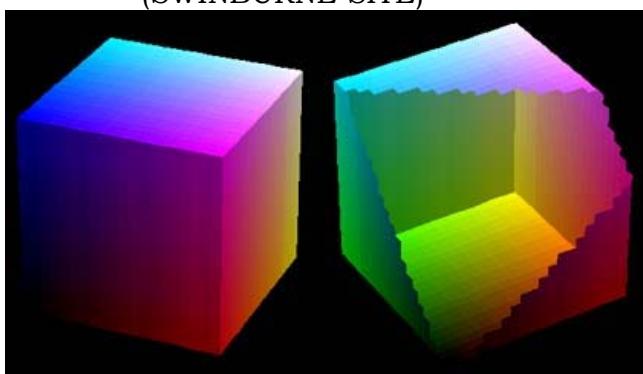


FIGURA 128. CUBO RGB. FONTE: SWINBURNE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (SWINBURNE SITE)



Algumas observações importantes sobre esse sistema:

- Note que a função r atravessa o zero das abscissas, o que indica a necessidade de valores negativos para essa componente. O significado físico desse sinal negativo somente pode ser entendido na operação de *matching* de cores. Se for apresentado a um observador uma determinada cor C e as três fontes de luz do padrão RGB, poderá ocorrer que ele não consiga obter C somando RGB. Ele precisará retirar parte da componente vermelha de C e então encontrará uma cor igual somando as componentes verde e azul do padrão que restaram. Em outras palavras, o padrão RGB não cobre todo o espectro de cores percebido pelo homem.

- O padrão RGB é dito dispositivo dependente. O significado disso pode ser entendido seguindo um exemplo: a soma dos máximos de cada função resulta, obviamente, na cor branca. Porém, esse branco será dependente da qualidade da emissão das fontes e por consequência, todas as demais coordenadas de cores resultarão em sensações diferentes conforme as características do dispositivo que captura ou na exibição da imagem. Em função disso o CIE padronizou uma série de brancos referência, condicionados a iluminação dos ambientes. Por exemplo, o D65 e o D50 são brancos padrões para dia claro com iluminação solar e ambiente fechado com iluminação artificial, respectivamente.

- A quase totalidade dos dispositivos de visualização trabalham explorando propriedades do sistema triestímulo. Assim são os CRT (tubos de raios catódicos), os LCD (monitores de cristal líquido), PDP (painéis de plasma) e as impressoras laser e jato de tinta. Nos CRT e PDP utilizam-se as cores primárias vermelho, verde e azul. Nos LCD e impressoras em geral as cores secundárias ciano, magenta e amarelo. Assim o modelo RGB é o que mais facilmente se adapta a produção de imagens nesses dispositivos, bastando para tal a implementação eletrônica de uma função de transferência que, a partir das coordenadas de cores, gere diferentes padrões de voltagem ou concentração de pigmentos. Devido a isso se popularizou o sistema RGB.

Percebe-se, das observações acima, que duas delas impõem restrições ao uso do sistema RGB. A Figura 129 ilustra uma dessas deficiências, a mais significativa para a análise das imagens.

Aqui se sugere que uma mesma pessoa terá percepções diversas da real quando observar a mesma cena em diversos dispositivos, mesmo que o mapeamento das cores seja único, ou seja, mesmo que as coordenadas RGB dos pontos da imagem se mantenham enquanto essa é transferida entre dispositivos. Esse aspecto é mais crítico do que se pode supor, pois não apenas representa observar objetos em cores distintas, mas, como a acuidade visual é função não linear do espectro, detalhes importantes para a interpretação da imagem podem não ser percebidos pelos observadores.

Para minimizar esse efeito o ICC (International Color Consortium) definiu o CMS (Color Management System) cujos DPs (Device Profiles) permitem a comunicação de informação de cores entre dispositivos mantendo padrões de estímulo visuais mais coerentes (Site do ICC, 2006).

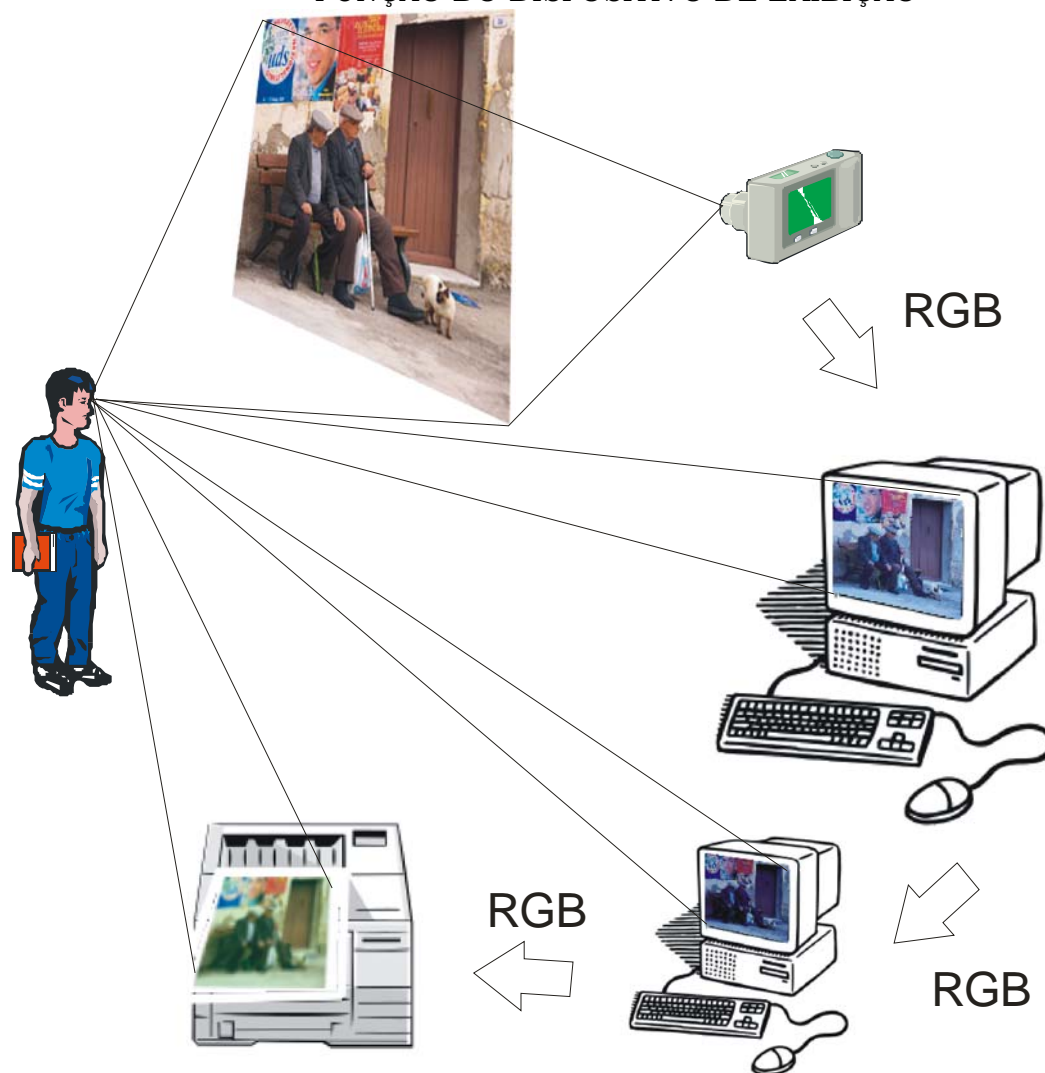
Então, quando uma câmara digital é acoplada a um avião para efetuar o voo sobre uma região da superfície da Terra, deve-se cuidar para o estabelecimento da sensibilidade do sensor em função do padrão correto de iluminação (White Balance – D65) e, posteriormente, para que o DP da câmara, do monitor do computador e/ou da impressora, onde a imagem vai ser exibida, estejam compatibilizados.

Esses cuidados vão garantir que a imagem estará o mais próxima possível da visão real da cena que o operador teria. É evidente que por vezes a manipulação digital da imagem é exigida, objetivando realce de algumas feições ou a correção de problemas de iluminação, mas ainda assim os objetos possuirão cores mais realistas e similares às que apresentariam se observados no ambiente real.

Do ponto de vista da análise automática das imagens uma questão deve ser abordada: o processamento da imagem no sistema RGB vai gerar um resultado similar ao que o observador humano obteria? Lembrando que no caso dos produtos cartográficos e dentro do objeto dessa pesquisa essa é

uma meta importante, pois, se está comparando uma imagem com o resultado de um mapa restituído manualmente.

FIGURA 129. ILUSTRAÇÃO DAS DIVERSAS PERCEPÇÕES DE UMA IMAGEM EM FUNÇÃO DO DISPOSITIVO DE EXIBIÇÃO

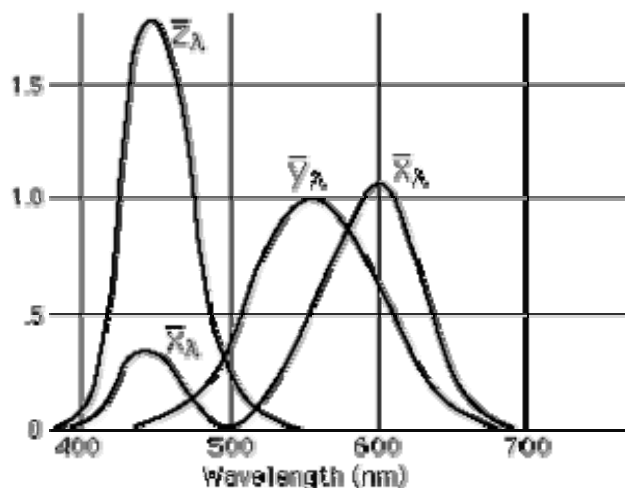


Algumas referências (Cucchiara, 2002; Fauqueur, 2002; Gu, 2001; Petrou, 1998) e teste realizados apontam no sentido da transformação das imagens do espaço de cores RGB para outros intuitivamente mais adequados, uniformes e normalizados e que são independentes do dispositivo, como os espaços $L^*u^*v^*$ e $L^*a^*b^*$, definidos pelo CIE.

A definição desses espaços de cores passa pelo estabelecimento do sistema referencial triestímulo do CIE, conhecido como XYZ. Esse sistema assemelha-se ao RGB, já apresentado, exceto que as coordenadas do espaço

de cores são sempre positivas para todas as suas componentes, como mostra a Figura 130.

FIGURA 130. SISTEMA TRIESTÍMULO DO CIE: COORDENADAS X,Y E Z.



A fim de normalizar as componentes é comum que tais coordenadas sejam apresentadas como valores decimais entre 0 e 1 de tal forma que a soma das componentes resulte na unidade, ou seja:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \therefore y = \frac{Y}{X+Y+Z} \therefore x + y + z = 1 \quad (54)$$

As coordenadas x,y constituem o espaço de cromacidade do sistema CIE, através dos quais as cores são definidas, conforme o diagrama da Figura 131. Nessa Figura foram preservados os nomes das cores como no original em inglês. A componente Y do espaço XYZ está diretamente relacionada a luminância da cor (brilho da imagem). Não é incomum, pois, que as cores sejam mapeadas pelas suas componente xyY.

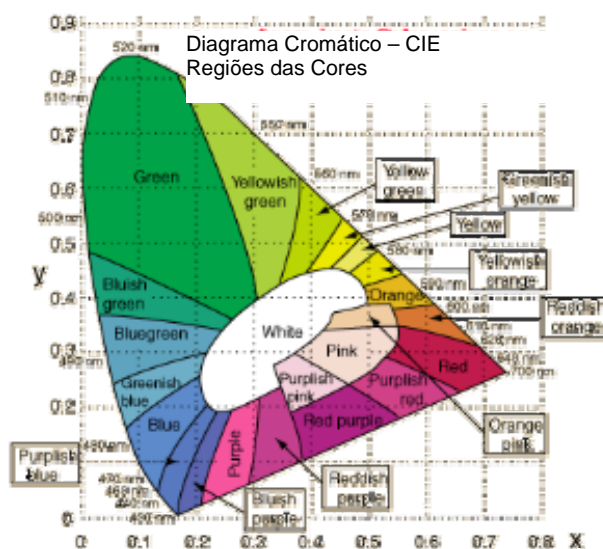
É importante considerar que a Figura 131 representa um corte no volume de cores, e que tal volume é o limite da percepção humana das cores. Agora observe-se uma impressão contínua do espaço de cromacidade como o da Figura 132(a), para uma luminância de 50%. É fácil perceber como as áreas correspondentes às cores primárias e secundárias (RGB, CMY) são aproximadamente iguais. Isso não reflete o comportamento da visão

humana, muito menos sensível a distinguir tons de verde do que de azul, por exemplo.

Essa não linearidade pode ser compensada utilizando-se transformações empíricas no espaço de cores x,y , como a proposta no CIE $L^*u^*v^*$ (para facilitar a notação CIELUV, com componente Luv) cuja disposição num diagrama de cromacidades equivalente está na Figura 132 (b).

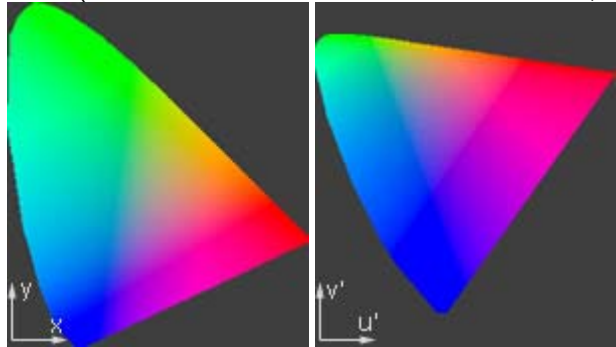
Quanto a utilidade prática dessa conversão, considere-se a seguinte situação: deseja-se determinar se um pixel de uma imagem colorida deve ser agregado a um cluster $C1$ ou a outro $C2$. A solução para esse problema passa por calcular a distância entre as coordenadas de cores do pixel e àquelas representativas de cada cluster, decidindo-se pela classe mais próxima. Pois bem, se essa decisão for tomada com base nas coordenadas do espaço de cores CIELUV, ela estará mais bem ajustada à decisão que seria tomada por um observador.

FIGURA 131. DIAGRAMA CROMÁTICO (CORT. DE PHOTO RESEARCH, INC.)



Não se deve ter a pretensão de considerar o espaço CIELUV como reproduzindo fielmente a percepção humana das cores, mas ele está bem mais próximo disso do que os demais espaços de cores.

FIGURA 132. DIAGRAMAS CROMÁTICOS DO CIE. ESPAÇO DE CORES XY E U'V', CIELUV. (CORTESIA DE PHOTO RESEARCH, INC.)



Uma das alternativas de processamento, relacionada diretamente à percepção da visão humana, é converter os dados brutos obtidos pela câmera no formato RGB para esse formato CIELUV. Essa conversão não é direta. Antes, deve-se converter RGB em XYZ e então XYZ em $L^*u^*v^*$.

Na primeira conversão, dois aspectos a serem considerados:

- Garantir que a câmera esteja ajustada à condição correta de iluminação. Isso se faz com o controle de White Balance, presentes na quase totalidade das câmaras digitais. Ainda, conferir, nos dados técnicos da câmera, a que branco referencial seu sistema de cores está ajustado. A tabela 31 mostra os valores possíveis, conforme o CIE.

TABELA 31. VALORES DO BRANCO REFERÊNCIA PARA UM REFLETOR DIFUSO IDEAL. FONTE CIE.

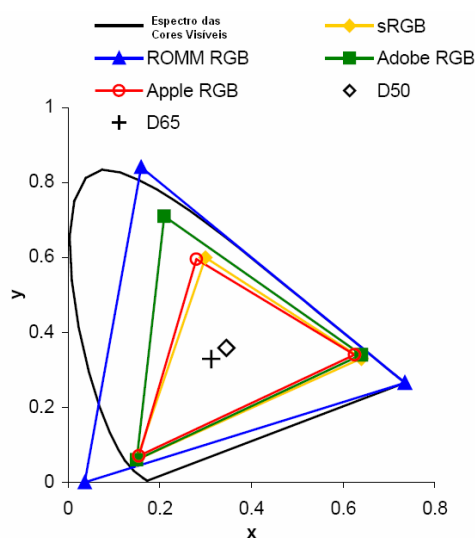
Iluminação	(CIE 1931)			(CIE 1964)		
	X_2	Y_2	Z_2	X_{10}	Y_{10}	Z_{10}
A (Incandescente)	109,850	100	35,585	111,144	100	35,200
C	98,074	100	118,232	97,285	100	116,145
D50	96,422	100	82,521	96,720	100	81,427
D55	95,682	100	92,149	95,799	100	90,926
D65 (Luz do Dia)	95,047	100	108,883	94,811	100	107,304
D75	94,972	100	122,638	94,416	100	120,641
F2 (Fluorescente)	99,187	100	67,395	103,280	100	69,026
F7	95,044	100	108,755	95,792	100	107,687
F11	100,966	100	64,370	103,866	100	65,627

- Determinar o tipo do RGB utilizado na conversão dos sinais digit da câmera para o arquivo de armazenamento, em geral nos formatos TIFF ou JPEG. Observe-se esse trecho do manual de uma câmera digital profissional (SONY, 2004):

*“...It allows real-time display and immediate application of adjustments to images and includes a wide array of RAW, TIFF or JPEG image editing functions, which give control over variables such as white balance, dynamic range, exposure compensation and colour tone. **sRGB, Adobe RGB and Wide Gamut RGB colour spaces** are supported, and an ICC (International Colour Consortium) profile is automatically attached to RAW images that have been converted to TIFF or JPEG formats.”*

O destaque no texto indica que esse dispositivo aceita três padrões diversos de RGB, e isso é comum nos atuais equipamentos. A Figura 133 apresenta os diagramas cromáticos abrangidos por alguns desses padrões, bem como a posição de dois brancos referenciais, normalmente por eles utilizados.

FIGURA 133. DIAGRAMA CROMÁTICO DE DIVERSOS ESPAÇOS DE CORES E SUA REFERÊNCIAS DE BRANCO. FONTE: SUSSTRUNK, BUCKLEY AND SWEN, 2006.



Evidentemente, em função do tipo do RGB e da posição do branco referencial a conversão entre os espaços de cores RGB e XYZ será efetuada seguindo parâmetros diversos. A conversão abaixo descrita é válida para um referencial D65 e para o espaço de cores sRGB, escolhidos em função do

experimento realizado, cujas imagens serão utilizadas nesse estudo. Para outros espaços e outras referências pode-se estudar a obtenção da matriz transformação, por exemplo, em EasyRGB Site.

Pseudocódigo da transformação RGB XYZ

i. Converte RGB [0:255] para RGB [0:1]

$$\text{ii. Se } RGB > 0.04045 \quad rgb = 100 \left(\frac{RGB + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \quad (55)$$

$$\text{Senão} \quad rgb = 100 \left(\frac{RGB}{12.92} \right) \quad (56)$$

$$\text{iii. Calcula} \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (57)$$

Obtidos os valores das coordenadas de cores no espaço XYZ a transformação para o espaço percepto-uniforme CIELUV, dá-se segundo o algoritmo a seguir.

Pseudocódigo da transformação XYZ CIELUV

- Calcula-se U e V

$$U = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (58)$$

$$V = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (59)$$

ii. Adota-se um valor de branco referência

Para CIE D65: $[X_r \ Y_r \ Z_r] = [95.047 \ 100.000 \ 108.883]$

iii. Calcula-se luminância da Cor

$$Y = Y/Y_r ;$$

$$\text{Se } Y > 0.008856 \quad y = \sqrt[3]{Y} \quad (60)$$

$$\text{Senão} \quad y = 7.787.Y + \frac{16}{116} \quad (61)$$

iv. Calcula-se coordenadas do branco referência

$$U_r = \frac{4X_r}{X_r + 15Y_r + 3Z_r} \quad (62)$$

$$V_r = \frac{9Y_r}{X_r + 15Y_r + 3Z_r} \quad (63)$$

v. Cálculo das coordenadas LUV

$$L = 116.y - 16 \quad (64)$$

$$u = 13.L.(U - U_r) \quad (65)$$

$$v = 13.L.(V - V_r) \quad (66)$$

Tanto na conversão RGB XYZ, como na conversão XYZ CIELUV há um teste para correção não linear no caso de valores de muito baixa luminância. Ainda cabe salientar que alguns estudos baseados em Nemcsics (1993) têm relatado resultados ainda melhor uniformizados quando a componente L não é calculada como função da raiz cúbica de Y, mas sim como função da raiz quadrada de Y. Então a equação 64 ficaria $L = 10\sqrt{Y}$, sendo as demais calculadas como descrito. Nesse trabalho foi considerada a transformação descrita no pseudocódigo, recomendada pelo CIE.

Até aqui as cores das imagens foram analisadas do ponto de vista do favorecimento da interpretação humana. Outra alternativa, como já se disse anteriormente, é atentar somente para exploração do máximo de informação contida nas imagens e otimizar os dados para o processo de segmentação. Essa abordagem é clássica e estudos como Ohta, (1980), é base de muitas outras pesquisas sobre o tema.

Ohta fez uso de um conhecido algoritmo de segmentação do tipo Ohlander (Ohlander, 1975) sobre um banco de imagens. Para cada região segmentada foi aplicada a KLT (Transformada de Karhunen Løve, ou transformação de componentes principais) e efetuada uma regressão sobre as componentes principais obtidas, como função das bandas RGB originais. A conclusão é que se pode obter resultados aproximados para as componentes principais aplicando a seguinte transformação sobre as coordenadas RGB:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & -1 \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (67)$$

I_1 , I_2 e I_3 são, pois, coordenadas de cores num novo espaço, otimizado para segmentação do conjunto de imagens testado pelo autor. Na mesma referência há resultados indicativos de que somente as duas primeiras componentes (I_1 e I_2) são suficientes para uma segmentação de qualidade, como também foi detectado nos testes com a KLT executados no escopo dessa pesquisa.

Esse trabalho de Ohta é ainda fartamente referido como em Albin, et al (2002) e Trémeau, et al (2000), donde se comprova que tal espaço de cores é útil no processo de segmentação de imagens coloridas.